المركز القومى للترجمة

المشروع القومى للترجمة

التعالق
أكبر لغز فى الفيزياء

تأليف: أمير أكزيل

ترجمة: عنان على الشهاوى

مراجعة: مصطفى إبراهيم فهمى

1233


محمد خطاب



التعالق

أكبر لغز فى الفيزياء



المركز القومي للترجمة

إشراف : جابر عصفور

- العدد : ١٢٣٣
- التعالق أكبر لغز فى الفيزياء
- أمير أكزيل
- عنان على الشهاوى
- مصطفى إبراهيم فهمى
- الطبعة الأولى ٢٠٠٨

هذه ترجمة كتاب :

Entanglement

The Greatest Mystery in Physics

By : Amir D. Aczel

Published by arrangement with Thunder's Mouth Press
An Imprint of Avalon Publishing Group, Inc., USA

شارع الجبلاية بالأوبرا – الجزيرة – القاهرة . ت: ٢٧٣٥٤٥٢٤ – ٢٧٣٥٤٥٢٦ فاكس: ٢٧٣٥٤٥٥٤

El-Gabalaya St., Opera House, El-Gezira, Cairo
e.Mail:egyptcouncil@yahoo.com Tel.: 27354524 - 27354526 Fax: 27354554



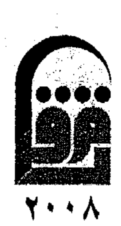
التعالق

أكبر لغز فى الفيزياء

تأليف : أمير أكزيل

ترجمة : عنان على الشهاوى

مراجعة : مصطفى إبراهيم فهمى



٢٠٠٨

بطاقة الفهرسة
إعداد الهيئة العامة لدار الكتب والوثائق القومية
إدارة الشئون الفنية

أكزيل ، أمير
التعالق أكبر لغز فى الفيزياء / تأليف : أمير أكزيل ؛
ترجمة : عنان على الشهاوى ؛ مراجعة : مصطفى إبراهيم فهمى ؛
ط١ - القاهرة ، المركز القومى للترجمة ، ٢٠٠٨
٢٦٤ ص ؛ ٢٤ سم
١ - الفيزياء
(أ) الشهاوى ، عنان على (مترجم)
(ب) فهمى ، مصطفى إبراهيم (مراجع)
(ج) العنوان ٥٣٠

رقم الإيداع ٢٠٠٨/١١٣١٧
الترقيم الدولى I.S.B.N. 977 - 437 - 755 - 9
طبع بالهيئة العامة لشئون المطابع الأميرية



المحتويات



مقــدمة

"الكون، فيما أظن شخصيا، ليس فحسب أغرب مما نفترض،
إنما هو أغرب مما يمكن أن نفترضه".

جى. بى. إس. هالدين

فى خريف عام ١٩٧٢، كنت طالبا أدرس الرياضيات والفيزياء بجامعة كاليفورنيا فى بيركلى. وهناك سنحت لى فرصة عظيمة لحضور محاضرة خاصة فى الجامعة يلقيها ويرنر هايزنبرج Werner Heisenberg، أحد واضعى نظرية الكم. وفى حين أن لدىَ اليوم بعض التحفظات حول الدور الذى لعبه هايزنبرج فى التاريخ - فى الوقت الذى هاجر فيه علماء آخرون احتجاجا على سياسات النازى، تخلف هو باقيا وكان أن أفاد فى محاولات هتلر لإنشاء القنبلة الذرية - على الرغم من هذا فإن حديثه كان ذا تأثير عميق وإيجابى فى حياتى؛ نظرا لأنه منحنى تقديرا عميقا لنظرية الكم وموقعها فى جهودنا لفهم الطبيعة .

على أن ميكانيكا الكم هى أكثر المجالات غرابة فى كل العلوم. ومن منظورنا اليومى للحياة على كوكب الأرض، لا يوجد ما هو مفهوم فى نظرية الكم، وهى النظرية الخاصة بقوانين الطبيعة التى تحكم عالم الجسيمات الدقيقة جدا (علاوة على بعض المنظومات الكبيرة، مثل الموصلات الفائقة). وكلمة كوانتم (كم - كمة) فى حد ذاتها تشير إلى حزمة بالغة الصغر من الطاقة. وفى ميكانيكا الكم، وهو الاسم الذى يطلق على نظرية الكم، نتناول قوالب البناء الأساسية للمادة، الجسيمات المكونة، التى يُصنع

منها كل ما فى الكون. وهذه الجسيمات تشمل: الذرات، الجزيئات، النيوترونات، البروتونات، الإلكترونات، الكواركات، وكذلك الفوتونات - وهى الوحدات الأساسية للضوء. كل هذه الأشياء، (إذا أمكننا حقا تسميتها بالأشياء) على درجة بالغة من الصغر حتى أنه لا يمكن رؤيتها بالعين المجردة. وعند هذا المستوى فإن كل قوانين السلوك المألوفة لدينا تصبح فجأة غير صحيحة. ويغدو دخول هذا العالم الجديد الغريب متناهى الصغر خبرة مربكة ومحيرة مثل قصة "مغامرات أليس فى بلاد العجائب". وفى عالم الكم غير الواقعي، نجد أن الجسيمات موجات والموجات جسيمات. وبذلك فإن شعاعا من الضوء هو معا موجة كهرومغناطيسية تتموج فى الفضاء وكذلك تيار من الجسيمات الدقيقة يتحرك مسرعا صوب الرائى. بمعنى أن بعض التجارب أو الظواهر الكمية تكشف عن الطبيعة الموجية للضوء، فى حين أن البعض الآخر يُظهر الطبيعة الجسيمية لنفس الضوء، لكنها لا تكشف أبدا المظهرين معا فى الوقت نفسه. ومع هذا، قبل أن نخضع شعاعا من الضوء للملاحظة، فإنه يكون معا موجة وتيارا من الجسيمات.

ويتسم كل ما فى عالم الكم بالغموض ؛ فثمة خاصية ضبابية لكل الكينونات (الكيانات) التى نتناولها، سواء كانت ضوءا أو إلكترونات أو ذرات أو كواركات. كما أن مبدأ عدم التحدد (أو عدم اليقين) هو المبدأ السائد فى ميكانيكا الكم، حيث لا يمكن رؤية معظم الأشياء أو الإحساس بها أو معرفتها بدقة، بل فقط من خلال الاحتمال والمصادفة الضبابيين. على أن التنبؤات العلمية عن النتائج هنا ذات طبيعة إحصائية ويمكن أن تُطرح بلغة الاحتمالات ، بإمكاننا التنبؤ فقط بأكثر المواقع احتمالا التى يوجد بها الجسيم، وليس موقعه بالضبط. ولا يمكننا على الإطلاق أن نعين معا موقع الجسيم وكمية حركته(*) بمنتهى الدقة. أكثر من هذا، فإن هذه الضبابية التى تتخلل عالم الكم لا يمكن لها أن تزول. فليس هناك "متغيرات خافية"، يمكن عند معرفتها أن تزيد لدينا درجة الدقة بحيث نتجاوز الحد الطبيعى الذى يتحكم فى عالم الكم. ذلك أن

(*) كمية الحركة هى حاصل ضرب الكتلة فى السرعة - (المترجم).

عدم التحدد، والغموض، ووجود الاحتمالات، والتشتت؛ جميعها ببساطة لا يمكن أن تزول ، فهذه العناصر – الملغزة والغامضة والمحتجبة – هى جزء متمم لأرض العجائب هذه .

بل إن هناك ما هو أكثر صعوبة فى تفسيره ألا وهو التراكب الغامض لحالات النظم الكمية. فإن إلكترونا (وهو جسيم أولى سالب الشحنة) أو فوتونا (وهو كم من الضوء) يمكن أن يكون فى تراكب من حالتين أو أكثر. ونحن لم نعد نتحدث عن "هنا أو هناك"، ففى عالم الكم نتحدث عن "هنا وهناك". وبمعنى ما، فالفوتون – وهو جزء من تيار الضوء يلتمع على حائل ذى ثقبين، يمكن أن يمر خلال الثقبين فى الوقت نفسه، بدلا مما يتوقع من احتمال مروره من الثقب الأول أو الثانى. والإلكترون الذى يتخذ مدارا حول النواة من المحتمل أن يكون فى أماكن عدة فى الوقت نفسه .

غير أن أكثر الظواهر إرباكا فى عالم الكم المحير هو الظاهرة المسماة بالتعالق entanglement ، حيث يوجد جسيمان تفصل بينهما مسافة قد تكون كبيرة جدا، ربما حتى ملايين أو مليارات الأميال، إلا أنهما مرتبطان معا على نحو غامض، فما يحدث لأحدهما يتسبب على الفور فى تغيير يطرأ على الجسيم الآخر[١].

وكان مما تعلمته من محاضرة هايزنبرج منذ ٣٠ عاما، هو أنه يتعين أن نترك جانبا كل مفاهيمنا السابقة عن العالم المستقاة من خبراتنا وأحاسيسنا، وبدلا من ذلك ندع الرياضيات تقود طريقنا. فالإلكترون يحيا فى فضاء مختلف عما نحيا فيه. وهو يعيش هو وغيره من الجسيمات والفوتونات فيما يطلق عليه الرياضيون فضاء هلبرت Hilbert space . وفضاء هلبرت هذا الذى أنشأه علماء الرياضيات على نحو مستقل عن الفيزياء، يبدو أنه يصف جيدا القواعد الغامضة لعالم الكم ، وهى القواعد التى لا يكون لها معنى بالنظر إليها بالعين التى تدربت من خلال خبراتنا اليومية. لذا فإن الفيزيائى الذى يعمل مع النظم الكمية يعتمد على الرياضيات لاستخراج تنبؤات من نتائج التجارب أو الظواهر، نظرا لأن هذا الفيزيائى نفسه لا يمتلك حدسا طبيعيا عما يحدث داخل ذرة أو شعاع من الضوء أو تيار من الجسيمات. ونظرية الكم تنطوى على اتهام لأخص مفاهيمنا عما يكون العلم ؛ لأننا لا نستطيع أن "نفهم" أبدا وحقا السلوك

الغريب للجسيمات بالغة الدقة. كما أنها تتهم أدق أفكارنا عما يشكل الواقع. ماذا تعنى"الحقيقة" فى سياق وجود الكينونات المتعالقة التى تعمل بتناغم حتى لو كانت تفصلها مسافات شاسعة؟

على أن النظرية الرياضية الجميلة عن فضاء هلبرت، الجبر المجرد، ونظرية الاحتمالات – أدواتنا الرياضية للتعامل مع الظواهر الكمية – تتيح لنا التنبؤ بنتائج التجارب إلى حد مذهل من الدقة؛ إلا أنها لا تفضى بنا لفهم العمليات الأساسية لها. ولعل فهم ما يحدث حقيقة داخل الصندوق الغامض لمنظومة كمية هو أمر خارج نطاق طاقة البشر. واستنادا إلى أحد تفسيرات ميكانيكا الكم، فإنه يمكن لنا استخدام الصندوق فقط للتنبؤ بالنتائج. وهذه التنبؤات ذات طبيعة إحصائية.

وثمة إغواء جارف يدفعنا لنقول: "جميل، إذا كانت النظرية لا تمكننا من فهم ما يحدث حقا، إذن هى ببساطة نظرية غير كاملة. لا بد أن بها شيئا خافيا – ربما بعض المتغيرات خافية – إذا تضمنتها معادلاتنا الرياضية، لأمكن استكمال معارفنا وأدت إلى الفهم الذى نبحث عنه". فى واقع الأمر فإن أكبر علماء القرن العشرين وهو ألبرت أينشتين Albert Einstein طرح هذا التحدى المهم لنظرية الكم الوليدة. وأينشتين الذى أدت نظرياته عن النسبية إلى الطريق لنا لرؤية المكان والزمان، قال إن ميكانيكا الكم ممتازة كنظرية إحصائية، لكنها لا تقدم وصفا كاملا للواقع الفيزيائى. وعبارته الشهيرة "الله لا يلعب النرد بالعالم" كانت انعكاسا لاعتقاده بأن ثمة طبقة أعمق، غير احتمالية فى نظرية الكم لم يتم اكتشافها بعد. وفى عام ١٩٣٥ أعلن مع زميليه بودولسكى Podol-sky وروسين Rosen معارضته للفيزياء الكمية؛ زاعما بأن النظرية غير كاملة. وأسس العلماء الثلاثة حجتهم على وجود ظاهرة التعالق، التى كانت بدورها قد تم استنتاج وجودها بناء على معالجات رياضية للأنظمة الكمية.

وفى حديث هايزنبرج عام ١٩٧٢ فى بيركلى، روى قصة إنشائه لطريقة تناول لنظرية الكم تسمى ميكانيكا المصفوفة matrix mechanics . وكان هذا واحدا من إسهاميه الكبيرين فى نظرية الكم، أما الآخر فهو مبدأ عدم التحدد. وقال إنه عندما

هدف إلى تطوير مفهومه عن المصفوفة فى عام ١٩٢٥ ، لم يكن يعرف كيفية إجراء عمليات ضرب المصفوفات (وهى من العمليات الأولية فى الرياضيات). لكنه علم نفسه بنفسه، وتلا ذلك تطوير نظريته. وبالتالى فإن الرياضيات هى التى تقدم للعلماء قواعد السلوك فى عالم الكم. كما أن الرياضيات قادت شرودنجر Schrodinger لطريقة تناوله البديلة والبسيطة لميكانيكا الكم، وهى المعادلة الموجية wave equation .

وبمرور السنين، تتبعت عن كثب التطورات الجارية فى نظرية الكم. وتناولت كتبى ألغازا فى الرياضيات والفيزياء. ويعرض كتاب "نظرية فيرمات الأخيرة" Fermat's Last Theory قصة البرهان العجيب لمسألة دامت منذ زمن بعيد؛ إذ إن كتاب "معادلة الرب" God's equation كان تجميعا لثابت أينشتين الكوزمولوجى (الكونى) وتمدد الكون؛ وجاء كتاب "لغز ألف" The Mystery of the Aleph وصفا للمحاولات الإنسانية لفهم اللانهاية. لكننى كنت أرغب دائما فى تناول أسرار الكم. وقد زودنى مقال حديث فى The New York Times بالحافز الذى كنت أحتاج إليه. وقد تناول المقال التحدى الذى وجهه ألبرت أينشتين وزميلاه لنظرية الكم، قائلين بأن النظرية التى تسمح بوجود ظاهرة "غير واقعية" وهى التعالق لا بد أنها تعانى من النقص .

ومنذ سبعة عقود، وضع أينشتين وأنصاره من العلماء تصوراً لطرق تثبت أن ميكانيكا الكم – وهى القواعد الغريبة التى تصف عالم الجسيمات باللغة الدقة – ليست إلا أشباحا يتعذر وجودها فى الواقع. ومن بين أشياء أخرى، أوضح أينشتين أن قياس جسيم واحد – تبعاً لميكانيكا الكم – يمكن أن يغير فى الوقت نفسه من خواص جسيم آخر، أيا ما كان مقدار المسافة بينهما. واعتبر أن هذه الظاهرة الحادثة على مسافة ما، المسماة بالتعالق، تبلغ حدا من اللامعقولية حتى إنه لا يمكن لها أن تحدث فى الطبيعة، واستخدم ببراعة تجاربه الفكرية سلاحا يكشف عن المضامين الغريبة التى تنطوى عليها هذه العملية، إذا كان ممكنا لها أن تحدث. إلا أن التجارب التى تم استعراضها فى ثلاثة أعداد تالية من مجلة Physical Review Letters أظهرت إلى أى مدى أساء أينشتين توجيه معالجته. وتوضح التجارب أن التعالق لا يحدث فحسب – وهو الأمر المعلوم منذ فترة – بل إنه يمكن استخدامه لإيجاد مجموعة قوانين لا يمكن نقضها[٢].

وكما علمت من دراستى لحياة ألبرت أينشتين وأعماله، أنه حتى عندما كان يعتقد أنه مخطئ (فيما يخص الثابت الكوزمولوجى) فقد كان على صواب. أما بالنسبة إلى عالم الكم فقد كان أينشتين واحدا من مطورى هذه النظرية. وأدركت تماما أنه أبعد من أن يكون مخطئا ، وأن الورقة التى قدمها أينشتين عام ١٩٣٥ – التى أشار إليها على نحو غير مباشر مقال فى Times – كانت بالفعل هى البذرة لأحد أهم الاكتشافات الفيزيائية فى القرن العشرين؛ الاكتشاف الفعلى للتعالق من خلال تجارب فيزيائية. وكتابنا هذا يحكى قصة البحث الإنسانى عن التعالق، الأكثر غرابة من بين كل الأوجه الغريبة لنظرية الكم.

بيد أن الكينونات المتعالقة (جسيمات أو فوتونات) ترتبط معا لأنها نتجت من خلال عملية معينة تربطها معا بطريقة خاصة. على سبيل المثال، إذا انبعث فوتونان من الذرة نفسها عندما يهبط أحد إلكتروناتها مستويين من الطاقة فإنهما يتعالقان. (يرتبط مستوى الطاقة بالمدار الذى يتخذه إلكترون بالذرة). وفى حين لا ينطلق أحدهما فى اتجاه محدد، فسوف نجد زوج الإلكترونات دائما فى جانبين متقابلين من الذرة، كما أن هذه الفوتونات أو الجسيمات – الناتجة بطريقة تجعلها مرتبطة ببعضها البعض – سوف تبقى متضافرة إلى الأبد، فإذا حدث تغير فى واحد منها، فإن توأمها – أيا كان موضعه بالكون – لا بد وأن يعتريه التغيير فى اللحظة نفسها.

فى عام ١٩٣٥، نظر أينشتين هو وزميلاه روسين وبودولسكى فى أمر وجود نظام يتكون من جسيمين متمايزين، وهو الأمر المسموح به حسب قواعد ميكانيكا الكم. وأسفرت حالة هذا النظام عن ظهور التعالق. ومن ثم استخدم أينشتين وبودولسكى وروسين هذا التعالق النظرى لجسيمين منفصلين ، لاستنتاج أنه إذا كانت ميكانيكا الكم تتيح وجود مثل هذه الظواهر الغريبة، إذن لابد أن وراء ذلك خطأ ما ، أو نقصا يتعلق بالنظرية، وذلك حسب ما ذهبوا إليه.

وفى عام ١٩٥٧ ، قام الفيزيائيان دافيد بوهم David Bohm وياكير أهارونوف Yakir Aharonov ، بتحليل نتائج تجربة أجرتها كل من سى . اس. وو C.S.Wu وآى شاكنوف

I.Shaknov قبل عشر سنوات تقريبا. وتوصلا إلى أول إشارة عن إمكانية حدوث تعالق فعلى لنظامين منفصلين فى الطبيعة، وبعد ذلك فى عام ١٩٧٢، كشف الفيزيائيان الأمريكيان جون كلاوزر John Clouser وستيوارت فريدمان Stuart Freedman عن وجود دليل يؤكد حدوث التعالق من الناحية الفعلية. وعقب ذلك ببضع سنوات قدم الفيزيائي الفرنسي آلان أسبكت Alain Aspect وزملاؤه أدلة أكثر إقناعا وكمالا عن وجود هذه الظاهرة. وقد سار الفريقان على خطى الأعمال النظرية المبكرة فى هذا المجال التى بدأها جون إس. بل John S. Bell وهو فيزيائى أيرلندى يعمل بجنيف، وكان قد طرح للبرهان أن التجربة الفكرية لكل من أينشتين، وبودولسكى، وروسين لم تكن مجرد فكرة منافية للعقل تستخدم لإبطال اكتمال نظرية الكم، بل الأرجح أنها تقدم وصفا لظاهرة حقيقية. على أن وجود الظاهرة يوفر أدلة فى صالح ميكانيكا الكم وفى مواجهة نظرة فيها تقييد للواقع.

ملحوظة للقارئ

إن نظرية الكم فى حد ذاتها، وبخاصة مفهوم التعالق، أمر بالغ الصعوبة على فهم أى شخص – حتى بالنسبة إلى الفيزيائيين المتمرسين أو الرياضيين – ولذلك قمت بتبويب الكتاب على نحو يتيح شرح الأفكار والمفاهيم المعروضة للنقاش وإعادة شرحها باستمرار بأشكال مختلفة. وهذه المقاربة تغدو مفهومة عندما نضع فى الاعتبار حقيقة أن بعض ألمع العلماء فى الوقت الحاضر أنفقوا كل حياتهم وهم يعملون فى التعالق؛ والحقيقة أنه حتى بعد عقود من البحث، فمن الصعوبة بمكان أن نجد من يستطيع أن يصرح بأنه يفهم نظرية الكم فهما تاما. إذ إن هؤلاء الفيزيائيين يعرفون كيف يطبقون قواعد ميكانيكا الكم فى العديد من الحالات، ويستطيعون إجراء الحسابات والتوصل إلى التنبؤات إلى درجة عالية من الدقة، وهو أمر نادر فى بعض المجالات الأخرى. بيد أنه حتى هؤلاء العلماء اللامعين، كثيرا ما يعترفون بأنهم لا يفهمون حقا ما يحدث فى عالم الكم. ولهذا السبب بالتحديد، فإننى فى هذا الكتاب، وفى كل فصل من فصوله،

أكرر مفاهيم نظرية الكم والتعالق، وأكررها فى كل مرة من زاوية مختلفة قليلا، أو كما شرحها عالم مختلف.

وحاولت جاهدا إدراج أكبر عدد ممكن من الأشكال الأصلية، التى حصلت عليها من العلماء، لتصف التجارب والتصميمات الفعلية. ويحدونى الأمل أن تساعد هذه الأشكال والرسومات القارئ على فهم عالم الكوانتم الملغز والعجيب، والأوضاع التى يتم فيها إنتاج ودراسة التعالق . فضلا عن ذلك، أوردت عددا من المعادلات الرياضية والرموز، فى مواضعها المناسبة. ولم يكن ذلك من باب إرباك القارئ، لكنى أوردتها لمن لديه بعض التأهيل المتقدم فى العلوم كى يستفيد من تحصيل المزيد من هذا العرض. على سبيل المثال، فى الفصل الخاص بأعمال شرودنجر أوردت الشكل الأبسط (والأكثر محدودية) لمعادلة شرودنجر الشهيرة ليستفيد منها من يرغب فى معرفة ما تبدو عليه هذه المعادلة. ومن المناسب تماما للقارئ – أو القارئة – أن يختار لنفسه إن أراد أن يتجاوز هذه المعادلات ويواصل القراءة، ومن يفعل ذلك لن يتكبد أى خسارة سواء فى المعلومات أو استمرار السياق.

وهذا كتاب عن العلم، صنع العلم، والفلسفة التى تكمن فى العلم، والأسس الرياضية التى يعتمد عليها، والتجارب التى من خلالها تتجلى الأسرار الداخلية للطبيعة وتتضح، وعن حياة العلماء الذين يسعون وراء أكثر الظواهر غرابة. ويؤلف هؤلاء العلماء فريقا من أعظم العقول فى القرن العشرين، وقد عاشوا حيواتهم جميعا طيلة هذا القرن. وهؤلاء الناس، بعزيمة لا تلين، أجروا بحوثهم سعيا لمعرفة أحد أسرار الطبيعة العميقة – التعالق – عاشوا ويعيشون حياتهم هم أنفسهم حتى إنهم تعالقوا مع بعضهم البعض. هذا الكتاب يروى إحدى قصص أحد أهم الكشوف العلمية فى التاريخ. وفى حين أن علم التعالق أيضا أسفر عن مولد تكنولوجيات جديدة بالغة الإثارة، فإن تركيز هذا الكتاب لا ينصب على التكنولوجيات التى نجمت عن هذه البحوث، فالتعالق هو أمر يدور حول البحث الذى يسمى بالعلوم الحديثة .

الفصل الأول

قوة غامضة للتوافق

"بكل أسف، عندما ترتدى معطف جاليليو، فلن يكفى ذلك لأن ينالك الاضطهاد من مؤسسة غاشمة، لابد أيضًا أن تكون على حق".

روبرت بارك

أمن المحتمل إذا حدث شيء ما هنا لَجَعَل شيئًا آخر يحدث فى موقع آخر بعيدا عنه فى آن واحد معه؟ إذا أجرينا قياسًا فى معمل لشيء ما، هل من المحتمل فى اللحظة نفسها، أن يقع حدث مشابه على بعد عشرة أميال، فى الجانب الآخر من العالم، أو فى الجانب الآخر من الكون؟ من المثير للدهشة، وعلى عكس أى حدس لدينا عما يجرى فى الكون، أن الإجابة هى نعم. هذا الكتاب يروى قصة التعالق، وهى ظاهرة تعنى أن كينونتين تظلان على ارتباط لا تنفصم عراه بصرف النظر عن مقدار المسافة بينهما. إنها قصة الناس الذين أمضوا حياتهم بحثًا عن دليل يؤكد أن هذه الظاهرة المحيرة جزء مكمل للطبيعة حقا، وهى الظاهرة التى تنبأت بها نظرية الكم وجعلها أينشتين موضع الاهتمام العلمى الواسع.

وأثناء دراسة هؤلاء العلماء لهذه التأثيرات، واستنتاجهم لأدلة محددة تثبت واقعية التعالق، فقد اكتشفوا أيضاً أوجهًا على نفس القدر من الإرباك لهذه الظاهرة. فلنتصور مثلاً أن لدينا أليسِ (Alice) وبوب (Bob)، وهما زوجان ينعمان بالسعادة.

وذهبت أليس بعيداً في رحلة عمل، بينما يلتقي بوب بكارول (Carol)، المتزوجة من ديف (Dave)، وكان ديف في هذا الوقت بعيداً أيضاً، في الجانب الآخر من العالم وفي مكان بعيد تماماً عن أي واحد من الثلاثة الآخرين. وأصبح بوب وكارول متصلين في تعالق مع بعضهما البعض، وتناسى كل منهما قرينه وصارا الآن يشعران بقوة أنه قد أريد لهما أن يبقيا مرتبطين للأبد. وعلى نحو غامض، فإن كلاً من أليس وديف - اللذين لم يلتقيا من قبل قط - يتعالقان أيضاً ببعضهما البعض، وفجأة يتقاسمان الأشياء التي يمارسها المتزوجون، دون حتى أن يلتقيا. وإذا استبدلنا أسماء الأشخاص المذكورين آنفًا في هذه القصة بجسيمات نرمز لها بالحروف أ ، ب ، ج ، د على الترتيب، حينئذ لحدثت فعليًا هذه النتيجة العجيبة، إذا تعالق الجسيمان أ ، ب وكذلك الجسيمان ج ، د نستطيع بالتالي إجراء تعالق بين الجسيمين أ ، د بتمرير ب ، ج خلال جهاز يؤدي إلى تعالقهما معًا.

باستخدام التعالق، فإن حالة جسيم معين يمكن أيضا نقلها عن بعد إلى موقع بعيد آخر، مثلما يحدث للكابتن كيرك Captain Kirk في المسلسل التليفزيوني Star Trek عندما يطلب نقله إشعاعيا ليعود إلى السفينة Enterprise. ولنكن على يقين من أنه لم يتمكن أي شخص حتى الآن من نقل إنسان آخر عن بعد، لكن أمكن بالمعمل نقل نظام كمي عن بعد. أكثر من هذا فإنه يتم حاليا استخدام هذه الظواهر المتعذر تصديقها في الكتابة بالشفرة وعمليات الحوسبة .

وفي مثل هذه التطبيقات التكنولوجية المستقبلية، يمتد التعالق غالبا ليشمل أكثر من جسيمين. فمن الممكن، على سبيل المثال، إيجاد مجموعات ثلاثية من الجسيمات، بحيث إن كل ثلاثة منها ترتبط بنسبة ١٠٠٪ ببعضها البعض. فأيًا كان ما يحدث لجسيم منها، فلابد أن يطرأ تغير مماثل في آن واحد للجسيمين الآخرين. وبالتالي تغدو الكينونات الثلاثية مرتبطة ارتباطًا حتميًا، أيًا كانت مواقع كل منها.

وذات يوم من عام ١٩٦٨، كان عالم الفيزياء أبنر شيموني Abner Shimony يجلس في مكتبه بجامعة بوسطن، وجذب اهتمامه - كما لو كان ذلك بقوة خفية -

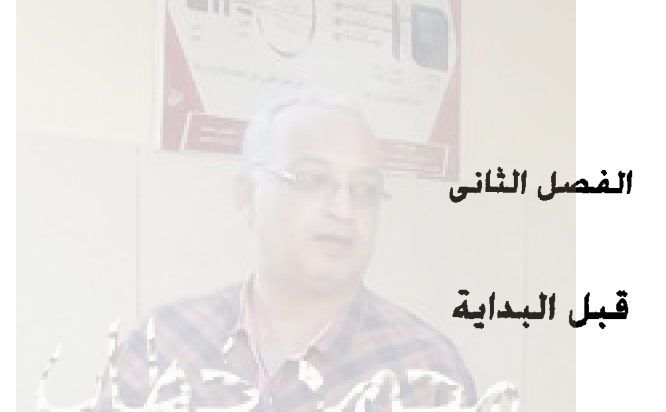
بحث كان قد ظهر قبل عامين فى مجلة محدودة الانتشار عن الفيزياء. وكان مؤلف هذا البحث هو جون بل John Bell وهو فيزيائي أيرلندى يعمل فى جنيف. وكان شيمونى ضمن أناس قليلين جداً، ممن لديهم القدرة والرغبة لفهم أفكار جون بل فهما حقيقيا. وعرف أن فرضية جون بل، كما هى موضحة ومثبتة فى المجلة، تسمح بإمكانية اختبار ما إذا كان جسيمان، كل منهما فى موضع بعيد عن الآخر، يمكن أن يعملا فى تناغم. وكان شيمونى قد سئل فى حينه من أحد زملائه الأساتذة بجامعة بوسطن، وهو تشارلز ويليس Charles Willes عما إذا كان يرغب فى الإشراف على طالب جديد يدرس الدكتوراه وهو ميشيل هورن Michael Horne فى أطروحة عن الميكانيكا الإحصائية. ووافق شيمونى على رؤية الطالب، إلا أنه لم يكن متحمسًا للإشراف على طالب يدرس الدكتوراه وهو فى عامه الأول للتدريس بجامعة بوسطن. وعلى أية حال فقد قال بأنه ليس لديه موضوع جيد يقترحه فى الميكانيكا الإحصائية. لكن، اعتقاداً منه بأن هورن قد يجد موضوعًا يستحق الاهتمام فى أسس ميكانيكا الكم، سلمه بحث جون بل. وحسب تعبير شيمونى: "كان هورن من الذكاء بحيث أدرك بسرعة أن موضوع جون بل مثير للاهتمام". وأخذ ميشيل هورن البحث إلى منزله لدراسته، وبدأ العمل فى تصميم تجربة باستخدام فرضية جون بل.

أما ما كان يجهله تمامًا عالما الفيزياء فى بوسطن، أن جون كلاوزر John F. Clauser من جامعة كولومبيا بنيو يورك كان يقرأ البحث نفسه الذى قدمه جون بل، وافتتن أيضاً على نحو غامض بالموضوع الذى طرحه جون بل، وأدرك أن ثمة فرصة لإجراء تجربة فعلية. وكان كلاوزر قد قرأ بحث أينشتين وبودولسكى وروسين، ورأى أن اقتراحهم جدير تمامًا بالتصديق ظاهريًا. وأوضحت فرضية جون بل وجود تعارض بين ميكانيكا الكم وتفسير الـ "متغيرات الخافية الموضعية" لميكانيكا الكم الذى طرحه أينشتين وزميلاه بوصفه بديلا لنظرية الكم "الناقصة". وثار حماس كلاوزر حول إمكانية إجراء تجربة تستفيد من هذا التعارض. واستبد الشك بكلاوزر، إلا أنه لم يستطع أن يقاوم إجراء اختبار لتنبؤات جون بل. كان كلاوزر طالبا فى الدراسات العليا، وأخبره كل من تحدث إليه أن يصرف النظر عن هذا الموضوع، ليحصل على شهادة الدكتوراه بدلاً من

العبث فى روايات الخيال العلمى. بيد أن كلاوزر كان يدرك الأمر أفضل منهم. إن مفتاح ميكانيكا الكم يكمن فى ثنايا بحث جون بل، وصمم كلاوزر على أن يجده.

وعبر المحيط الأطلنطى، بعد بضع سنوات، كان آلان أسبكت يعمل بجد فى معمله ببدروم مركز بحوث الضوء (البصريات) بجامعة باريس فى أورسيه Orsay. وكان يسابق الزمن لاكتشاف تجربة رائدة بمقدورها أن تبرهن على أن فوتونين فى جانبين متقابلين من معمله يمكن أن يؤثر كل منهما فى الآخر فى آن واحد. وكان أسبكت قد توصل إلى أفكاره من خلال البحث العميق نفسه الذى طرحه جون بل.

وفى جنيف التقى نيكولاس جيسين Nicholas Gisin مع جون بل، وقرأ أبحاثه وكان أيضاً يفكر فيما طرحه بل من أفكار. كما انخرط فى السباق ليجد إجابة للسؤال الحاسم نفسه: السؤال ذو المضامين العميقة حول الطبيعة العميقة للواقع. لكننا نستبق الأحداث، فإن قصة أفكار جون بل، التي تعود إلى اقتراح طرحه ألبرت أينشتين قبل ٣٥ عامًا، لها أصولها فى سعى البشر لمعرفة العالم الفيزيائى. ومن أجل أن نفهم حقيقة هذه الأفكار العميقة، يتعين أن نعود إلى الماضى.



الفصل الثانى

قبل البداية

"خارج هذه الأبعاد السحيقة، كان هذا العالم الهائل الذى يوجد مستقلاً عنا نحن البشر ويمْثل شاخصًا أمامنا مثل لغز سرمدى عظيم، يمكن ولو جزئيًا على الأقل، أن نتوصل إليه بفحصه".

ألبرت أينشتين

"رياضيات ميكانيكا الكم تتسم بالمباشرة، بيد أنها تجعل الصلة بين الرياضيات والصورة الحسية للعالم الفيزيائى بالغة الصعوبة".

كلود كوهين
تانودجى

نقرأ فى سفر التكوين: "قال الله: ليكن نور" وبعدها خلق الله السماء والأرض وكل الموجودات التى ملأتهما ...، ويعود تساؤل البشر لفهم الضوء والمادة إلى فجر الحضارة، حيث إنهما العنصران الأساسيان للتجربة الإنسانية. وكما أوضح لنا أينشتين،

فإن الاثنين هما شيء واحد وهما الشيء نفسه: فالضوء والمادة شكلان من أشكال الطاقة. وقد جاهد الناس دائماً لفهم معنى هذين الشكلين للطاقة. ما هى طبيعة المادة؟ وما هو الضوء؟

وقد حاول المصريون القدماء والبابليون ومن تلاهم من الفينيقيين واليونان فهم أسرار المادة والضوء والصوت والألوان. ونظر اليونانيون إلى العالم بأول عيون حديثة تتسم بالعقلانية. ومع شغفهم بالأعداد والهندسة الممتزج برغبة عميقة فى فهم الأفعال الداخلية للطبيعة والبيئة المحيطة بهم، قدموا للعالم أفكاره الأولى عن الفيزياء والمنطق.

وفى رأى أرسطو Aristotle (٣٠٠ قبل الميلاد) أن الشمس كاملة الاستدارة وتحتل مكانها بالسماء وهى خالية من أى انبعاجات أو عيوب. أما إيراتوثينيز(*) Eratosthenes من قورنية Cyrene [مابين ٢٧٦ – إلى ١٩٤ قبل الميلاد] فقد حسب طول محيط كوكبنا بقياس الزاوية التى كانت تصنعها أشعة الشمس فى Cyene (أسوان الحالية) بصعيد مصر مقابل الزاوية التى تصنعها فى الوقت نفسه فى بأقصى شمال البلاد بالإسكندرية. والمدهش أن جاءت النتيجة قريبة جداً من المحيط الفعلى للأرض البالغ ٢٥ ألف ميل .

وكتب الفيلسوفان الإغريقيان أرسطو وفيثاغورث حول الضوء وخواصه المرئية، وكانا مفتونين بهذه الظاهرة. فى حين كان الفينيقيون أول شعب فى التاريخ يصنع العدسات الزجاجية، التى أتاحت لهم تكبير الأشياء وتركيز أشعة الضوء. وقد وجد علماء الآثار عدسات مكبرة عمرها ٣٠٠٠ سنة فى منطقة شرق البحر المتوسط حيث أقام الفينيقيون. والمثير للاهتمام، أن مبدأ النجاح فى عمل العدسات هو إبطاء سرعة الضوء عند نفاذه خلال الزجاج .

وتعلم الرومان صناعة الزجاج من الفينيقيين، وغدت أعمال الزجاج لديهم واحدة من الصناعات المهمة فى العالم القديم. وكان الزجاج الرومانى ذا نوعية راقية حتى إنه

(*) إيراتوثينيز : عالم رياضى وفلكى وجغرافى إغريقى، كان أول من حسب محيط الأرض. [المترجم]

كان يستخدم في صناعة المنشور الثلاثي. وكان سينيكا(*) (٥ق م-٤٥م) أول من وصف المنشور وتحليل الضوء الأبيض إلى الألوان التى يتكون منها(**). وتعتمد هذه الظاهرة أيضًا على سرعة الضوء. ولا يوجد أى دليل لدينا على إجراء تجارب فى العصور القديمة لتحديد سرعة الضوء. إذ يبدو أن القدماء كانوا يعتقدون أن الضوء ينتقل فى التو واللحظة من مكان إلى آخر. ونظرا إلى السرعة الهائلة للضوء؛ لذلك لم يتمكنوا من اكتشاف التأخيرات متناهية الصغر عند انتقاله من المصدر إلى موقع سقوطه. ولم تبدأ المحاولة الأولى لدراسة سرعة الضوء إلا بعد ١٦٠٠ عام من ذلك.

وكما نعلم فإن جاليليو كان أول إنسان حاول تقدير سرعة الضوء. ومرة أخرى، فإن التجارب التى أجريت على الضوء كانت وثيقة الصلة بصناعة الزجاج. وبعد انهيار الإمبراطورية الرومانية فى القرن الخامس، هرب العديد من الرومان من الطبقة الأرستقراطية وذوى الخلفيات المهنية إلى بحيرات فينيسيا وأنشأوا الجمهورية الفينيسية republic of Venice وجلبوا معهم فنون صناعة الزجاج، وهكذا تأسست أعمال الزجاج فى جزيرة مورانو Murano . وكانت أجهزة التليسكوب الخاصة بجاليليو من هذه النوعية الراقية - وفى الحقيقة كانت أفضل كثيراً من التليسكوبات الأولى المصنوعة فى هولندا - لأنه استخدم العدسات المصنعة من زجاج مورانو. وبمساعدة هذه التليسكوبات اكتشف الأقمار التى تدور حول كوكب المشترى Jupiter، والحلقات حول كوكب زحل Saturn، واستطاع تحديد أن مجرة درب اللبانة Milky Way هى تجمُّع لعدد كبير من النجوم.

وفى عام ١٦٠٧ أجرى جاليليو تجربة على اثنين من قمم تلال إيطاليا، وضع على قمة أحدهما فانوسًا غير مغطى، وما أن شاهد أحد مساعديه على القمة الثانية الضوء،

(*) لوسيوس أناسيوس سينيكا (٥ق.م - ٤٥م) خطيب وزعيم سياسى رومانى ، وضع عدداً من المؤلفات المسرحية التراجيدية والفلسفية . (المترجم) .

(**) يتحلل الضوء الأبيض خلال المنشور إلى ألوان الطيف المعروفة: بنفسجى ،..............، أحمر . (المترجم)

كشف غطاء فانوسه، وحاول الشخص الموجود على القمة الأولى تقدير الزمن بين فتح الفانوس الأول ورؤية الضوء العائد من الفانوس الثانى. ومع هذا باءت تجربة جاليليو الطريفة بالفشل، وذلك بسبب الزمن متناهى الصغر المنقضى بين إرسال الإشارة من الفانوس الأول وعودة الضوء من قمة التل الأخرى. ومع ذلك لابد من ملاحظة أن كثيراً من هذا الزمن المقطوع ضاع سدى بسبب زمن الاستجابة البشرية فى كشف غطاء الفانوس الثانى، وليس بسبب الزمن الفعلى الذى أمضاه الضوء فى قطع هذه المسافة.

وبعد نحو ٧٠ عامًا، وفى عام ١٦٧٦ أصبح الفلكى الدانمركى أولاف رومر Olaf Romer ، أول عالم يتمكن من حساب سرعة الضوء. واستطاع تنفيذ تلك المهمة باستخدام أرصاد فلكية لأقمار المشترى، التى اكتشفها جاليليو. وقد صمم رومر نظامًا ماهراً لأقصى حد وبالغ التعقيد، أمكن من خلاله تسجيل أوقات خسوف أقمار المشترى. وكان يعلم أن الأرض تدور حول الشمس وبالتالى تصبح الأرض على مواضع مختلفة فى الفضاء فى مواجهة المشترى وأقماره. ولاحظ رومر أن أوقات اختفاء أقمار المشترى خلف كوكبها لم تكن متساوية المقدار. ونظراً لأن الأرض والمشترى من ضمن الكواكب التى تدور حول الشمس، لذلك فإن المسافة بينهما تتغير. وبالتالى فإن الضوء الذى يدلنا على حدوث خسوف أحد أقمار المشترى يستغرق أوقاتا زمنية مختلفة عند وصوله إلى الأرض. ومن خلال اختلاف الأزمنة وكذلك معرفته بمدارى الأرض والمشترى تمكن رومر من حساب سرعة الضوء، وتوصل إلى أنها تبلغ ١٤٠ ألف ميل فى الثانية، وهذه بالطبع أقل من القيمة الفعلية البالغة ١٨٦ ألف ميل فى الثانية. ومع ذلك، بالوضع فى الاعتبار تاريخ هذا الاكتشاف، فضلاً عن حقيقة أن الزمن كان يتعذر قياسه بدرجة عالية من الدقة باستخدام ساعات القرن السابع عشر، فإن إنجازه – أول تقدير لسرعة الضوء وأول إثبات أن الضوء لا يسير بسرعة لانهائية – يعتبر علامة بارزة بالغة القيمة فى تاريخ العلم .

وفى عام ١٦٣٨، كتب ديكارت(*) Descartes عن علم الضوء فى مؤلفه الانكساريات Dioptrics، ونص فيه على قانونى انتشار الضوء: قانون الانعكاس والانكسار. واحتوى كتابه على بذور أهم الأفكار المثيرة للجدل فى مجال الفيزياء: وهى الأثير ether. ووضع ديكارت فرضية تقول إن الضوء يلزمه وسط ينتشر خلاله وأطلق على هذا الوسط اسم الأثير. وظلت هذه الفكرة ملازمة للعلم ولم يستطع التخلص منها طيلة ٣٠٠ عام أخرى، حتى تمكنت نظرية النسبية لأينشتين أن توجه لها ضربة قاضية فى نهاية المطاف.

وطرح كل من كريستيان هايجنز(**) Christian Huygens (1629 - 1695) وروبرت هوك Robert Hooke(1635 - 1703) أسس نظرية تقول بأن الضوء يسير فى شكل موجة wave. وكان هايجنز وهو لا يزال صبيا فى سن السادسة عشرة قد درس على يدى ديكارت أثناء إقامته فى هولندا، وأصبح واحداً من أعظم المفكرين فى ذلك الوقت. وطور أول ساعة تعمل بالبندول، وقدم إضافات لعلم الميكانيكا. ومع ذلك كان من أعظم إنجازاته نظريته حول طبيعة الضوء، إذ قام هايجنز بتفسير اكتشاف رومر حول السرعة المحدودة للضوء، بأن ذلك يعنى أن الضوء لابد أنه ينتشر فى حركة موجية خلال وسط معين. وعلى أساس هذه الفرضية أنشأ هايجنز نظرية كاملة. ففى تصوره أن الوسط المسمى الأثير يتألف من عدد هائل من جسيمات دقيقة مرنة، وحين يتم إثارة هذه الجسيمات إلى ذبذبات، تنتج عنها الموجات الضوئية.

وفى عام ١٦٩٢، استكمل إسحق نيوتن Isaac Newton (1643 -1727) كتابه Opticks حول طبيعة الضوء وانتشاره، وضاع الكتاب فى حريق شب فى منزله، ولذلك أعاد نيوتن كتابته مرة أخرى من أجل النشر فى عام ١٧٠٤ . وتضمن كتابه هجوماً شرساً على نظرية هايجنز، وذكر أن الضوء ليس موجات بل يتألف من جسيمات دقيقة تسير بسرعات تعتمد على لونه. وطبقاً لنيوتن يتكون قوس قزح من سبعة ألوان: الأحمر، الأصفر، الأخضر، الأزرق، البنفسجى، البرتقالى، النيلى. ولكل لون سرعته فى الانتشار.

(*) رينيه ديكارت ١٥٩٦ – ١٦٥٠ فيلسوف وفيزيائى ورياضى فرنسى ويعتبر مؤسس الفلسفة الحديثة .

(**) كريستيان هايجنز فيزيائى وفلكى هولندى – اخترع أول ساعة تعمل بالبندول .

وتوصل نيوتن إلى هذه الألوان السبعة من خلال مقارنة مع الفقرات السبع الرئيسية للثمانية الموسيقية. وواصلت الإصدارات الأخرى لكتاب نيوتن الهجوم على نظريات هايجنز وركزت فى نقاشاتها على ما إذا كان الضوء موجياً أو جسيمياً. والغريب فى الأمر، أن نيوتن – الذى شارك فى اكتشاف حساب التفاضل والتكامل ويعتبر واحداً من أعظم علماء الرياضيات على مر العصور – لم يزعج نفسه بتناول اكتشاف رومر حول سرعة الضوء أو حتى يولى للنظرية الموجية الاهتمام الذى تستحقه.

إلا أن نيوتن – تأسيسًا على المبادئ التى أرساها ديكارت، وجاليليو، وكبلر، وكوبرنيكوس – قدم للعالم الميكانيكا الكلاسيكية ومن خلالها قدم مفهوم السببية. وينص القانون الثانى لنيوتن على أن القوى المؤثرة فى الجسم تساوى حاصل ضرب كتلة الجسم فى العجلة F = ma. والعجلة هى المشتقة الثانية للموضع أو هى معدل تغير السرعة؛ والسرعة بدورها هى معدل تغير إزاحة الجسم. ولذلك فإن قانون نيوتن عبارة عن معادلة تتضمن فيها مشتقة (ثانية). وهى تسمى معادلة تفاضلية من (الدرجة الثانية). وتحتل المعادلات التفاضلية أهمية كبيرة فى الفيزياء، نظراً لأنها تقدم صيغة للتغير. وتعتبر قوانين الحركة لنيوتن تعبيرا عن السببية. إذ إنها تتناول السبب والنتيجة. فإذا علمنا الموضع الابتدائى وسرعة جسم له كتلة معينة وعلمنا مقدار القوة المؤثرة واتجاهها، فى هذه الحالة يصبح بمقدورنا تماما حساب النتيجة النهائية: أين سيكون موضع الجسم بعد زمن معين.

على أن نظرية نيوتن البديعة الخاصة بالميكانيكا يمكنها التنبؤ بحركة الأجسام الساقطة فضلاً عن مدارات الكواكب. ونستطيع باستخدام هذه العلاقات بين السبب والنتيجة التنبؤ بالمسار الذى يتخذه جسم معين. وتمثل نظرية نيوتن صرحًا هائلاً من خلالها يمكن تفسير كيفية تحرك الأجسام الكبيرة – وجميع الأشياء التى نلمسها فى حياتنا اليومية – من موضع إلى موضع، طالما أن سرعاتها أو كتلها ليست بالغة الجسامة. أما بالنسبة إلى السرعات التى تقترب من سرعة الضوء، أو الأجسام التى تناهز فى كتلتها كتل النجوم، تكون نظرية النسبية العامة لأينشتين هى الصحيحة.

وتتوقف عن العمل الميكانيكا النيوتونية الكلاسيكية. ويتعين مع ذلك ملاحظة، أنه يمكن تطبيق نظريتى أينشتين: النسبية العامة والخاصة، مع بعض التحسينات على ميكانيكا نيوتن، حتى فى الأوضاع التى تتحقق فيها بقدر مناسب من التقريب.

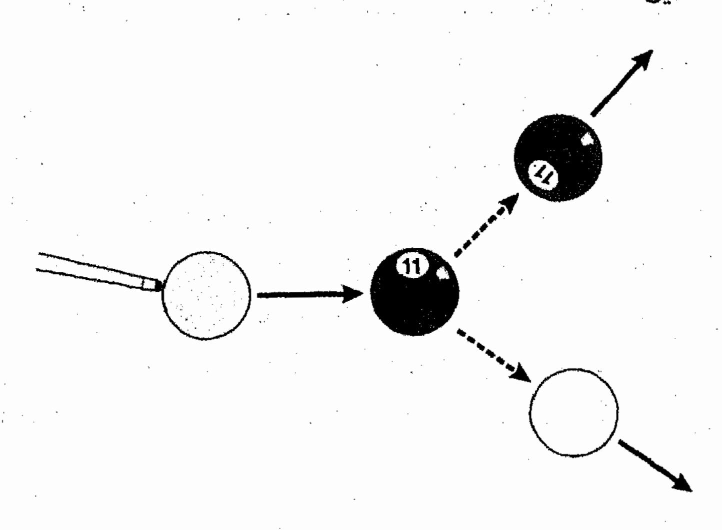
وعلى نحو مماثل، لا تنطبق نظرية نيوتن أيضا على الأجسام بالغة الصغر - الإلكترونات، والذرات، والفوتونات. وفى إطارها كذلك يضيع مفهوم السببية. فالعالم الكمى لا يمتلك تركيب السبب والنتيجة الذى نعرفه من خلال ممارساتنا اليومية. وفيما يعرض من الجسيمات الدقيقة التى تنطلق بسرعات تقترب من سرعة الضوء، لا يلائمها إلا ميكانيكا الكم النسبية.

وأحد أهم المبادئ الأساسية فى الفيزياء الكلاسيكية - وهو مبدأ له صلة كبيرة بقصتنا- هو مبدأ حفظ كمية الحركة (العزم). ويذكر أن مبادئ حفظ الكميات الفيزيائية معلومة لدى الفيزيائيين فيما يزيد عن ثلاثة قرون. وفى هذا الكتاب: المبادئ الأساسية Principia، الصادر عام ١٦٨٧، عرض نيوتن قانونيْه فى حفظ الكتلة وكمية الحركة. وفى عام ١٨٤٠، استنتج الطبيب الألمانى جوليوس روبرت ماير Julius Robert Mayer (1878 - 1812) أن الطاقة تخضع لمبدأ الحفظ أيضًا. وكان ماير يعمل طبيبًا جراحًا لسفينة فى رحلة من ألمانيا إلى جاوة(*) Java وأثناء علاجه لطاقم بحارة السفينة من الإصابات المختلفة فى المناطق الاستوائية، لاحظ دكتور ماير أن الدم النازف من جراحهم أكثر احمراراً من الدم الذى شاهده فى ألمانيا. وكان ماير قد سمع بنظرية لافوازييه Lavoisier القائلة بأن حرارة الجسم تنجم عن عملية أكسدة السكر بأنسجة الجسم باستخدام الأكسيجين الموجود فى الدم. واستدل بناءً على ذلك أن الجسم البشرى فى المناطق الاستوائية الدافئة يحتاج إلى إنتاج حرارة أقل من احتياجه لها فى أوروبا الشمالية الأكثر برودة، وبالتالى يتبقى مزيد من الأكسيجين فى دم قاطنى المناطق الاستوائية وهو ما يؤدى إلى زيادة احمرار الدم. وباستخدام الحجج حول كيفية تفاعل الجسم مع البيئة - إذ يمنح ويكتسب الحرارة - افترض ماير أن الطاقة

(*) جاوة : إحدى جزر إندونيسيا . (المترجم)

تخضع لمبدأ الحفظ. وهذه الفكرة استنتجها تجريبيًا جول **Joule**، وكلفن **Kelven**، وكارنوت **Carnot**. وفى وقت سابق اكتشف ليبنتيز **Leibniz** أنه يمكن تحويل طاقة الحركة إلى طاقة وضع والعكس بالعكس. والطاقة أيًا كانت صورتها (بما فى ذلك الكتلة) ينطبق عليها مبدأ الحفظ؛ بمعنى أنه لا يمكن تخليقها من العدم. والأمر نفسه ينطبق على كمية الحركة، وكمية الحركة الزاوية، والشحنات الكهربية. وقانون حفظ كمية الحركة على جانب كبير من الأهمية فى قصتنا.

لنفرض أن كرة بلياردو متحركة تصطدم بأخرى ساكنة. الكرة المتحركة لها كمية حركة مرتبطة بها = حاصل ضرب كتلتها فى سرعتها، **P = mv**، وناتج ضرب الكتلة فى السرعة، الذى يمثل كمية حركة كرة البلياردو لابد من الاحتفاظ به داخل هذا النظام. وإذا اصطدمت كرة بأخرى، إذن ستنخفض سرعتها، إلا أن الكرة الأخرى التى وقع عليها الاصطدام ستكتسب حركة أيضًا. ويجب أن يكون حاصل ضرب السرعة فى الكتلة لمجموع الكرتين قبل التصادم مساويًا لمثيله بعد التصادم، فالكرة الساكنة تكون كمية حركتها مساوية للصفر، وبالتالى تتوزع كمية حركة الكرة الأولى على الاثنتين. والشكل التالى يوضح المثال السابق، ونرى منه أنه بعد التصادم تتحرك الكرتان فى اتجاهين مختلفين.



وفى أى عملية فيزيائية تكون كمية الحركة الكلية الداخلة (قبل التصادم) مساوية لإجمالى كمية الحركة الناتجة (بعد التصادم). وعند تطبيق هذا المبدأ فى عالم الجسيمات بالغة الدقة، سينطوى على نتائج أكثر عمقًا من هذه الفكرة البسيطة والحدسية لمبدأ الحفظ. وفى ميكانيكا الكم، إذا تفاعل جسيمان معًا عند نقطة معينة– على غرار كرتى البلياردو فى المثال السابق – فسيبقيان متضافرين أحدهما مع الآخر، لكن إلى مدى أبعد بكثير مما حدث لكرتى البلياردو. فإذا ما وقع حادث لأحد الجسيمين، وبصرف النظر عن المسافة التى يصل كل منهما إليها بعيداً عن توأمه، فسوف يتأثر على الفور الجسيم التوأم.


محمد خطاب



الفصل الثالث

تجربة توماس يانج

"نحن نختار فحص ظاهرة (تجربة الثقب المزدوج) وهذه ظاهرة يستحيل، يستحيل تماماً، تفسيرها بأى وسيلة كلاسيكية، وتنطوى فى داخلها على لب ميكانيكا الكم. فى الواقع، إنها تتضمن السر الوحيد".

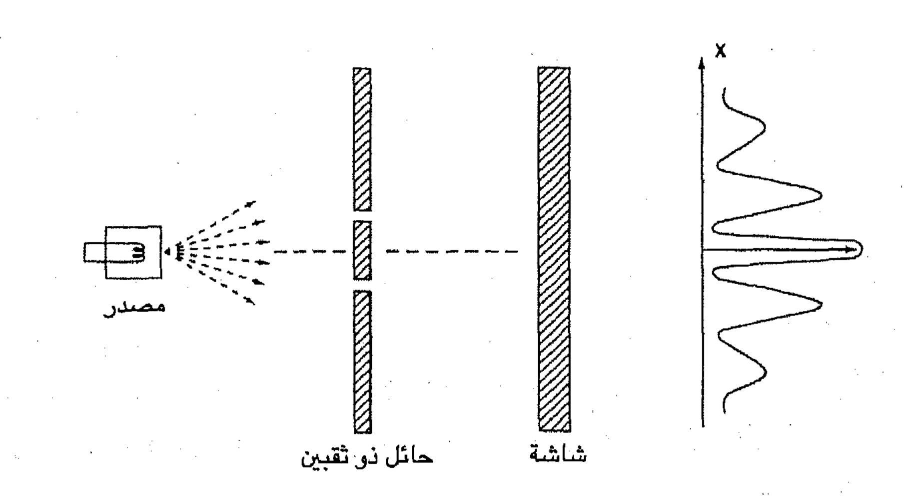
ريتشارد فينمان Richard Feynman

كان توماس يانج (1829 - 1773) Thomas Young البريطانى الجنسية، هو الفيزيائى الذى غيرت تجربته طريقة تفكيرنا فى الضوء. فى طفولته أبدى يانج عبقرية ملحوظة حينما تعلم القراءة فى الثانية من عمره، وفى سن السادسة كان قد قرأ الكتاب المقدس مرتين وتعلم اللغة اللاتينية. وقبل أن يبلغ التاسعة عشرة كان يجيد ١٣ لغة، منها اليونانية والفرنسية والإيطالية، والعبرية والكلدانية والسريانية والسومرية والفارسية والحبشية والعربية والتركية. وقام بدراسة حساب التفاضل والتكامل الذى وضعه نيوتن، وباقى مؤلفاته عن الميكانيكا والضوء، وكذلك كتاب لافوازييه عناصر الكيمياء Elements of Chemistry كما قرأ المسرحيات ودرس القانون وتعلم السياسة.

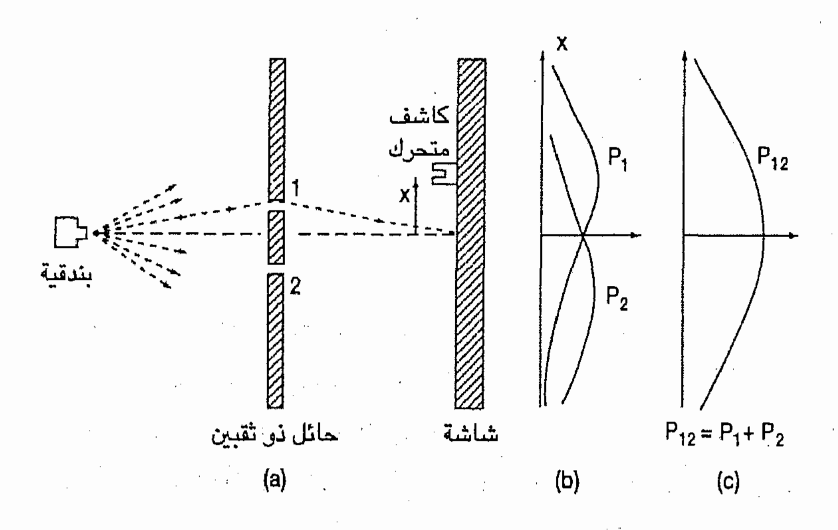
ومع نهاية القرن الثامن عشر درس يانج الطب فى لندن وادنبرة وجوتنجن، حيث نال شهادة الدكتوراه فى الطب. وفى عام ١٧٩٤ ، اختير عضواً فى الجمعية الملكية

Royal Society. وبعدها بثلاث سنوات، انتقل إلى جامعة كامبردج حيث نال شهادة دكتوراه ثانية وانضم إلى الكلية الملكية للأطباء. وعقب وفاة أحد أعمامه الأثرياء مخلفاً له ميراثاً يضم منزلاً فى لندن وأموالاً كثيرة، نزح يانج إلى العاصمة وأسس بها عيادة طبية، لكنه لم يكن طبيباً ناجحاً، ولذلك كرس جهوده للدراسة وإجراء التجارب العلمية. ودرس يانج الإبصار وقدم لنا نظريته القائلة بأن العين تحتوى على ثلاثة أنواع من مستقبلات الضوء للألوان الثلاثة الأساسية، وهى الأحمر والأزرق والأخضر. وأسهم يانج فى الفلسفة الطبيعية، وفيزيولوجيا البصريات، وكان من أوائل من قاموا بالترجمة من الهيروغليفية المصرية. وتمثل أعظم إسهاماته للفيزياء فى جهوده لتحوز النظرية الموجية للضوء القبول. وأجرى يانج تجربة الثقب المزدوج التى غدت شهيرة حالياً، لأنها تثبت ظاهرة التداخل من خلال النظرية الموجية.

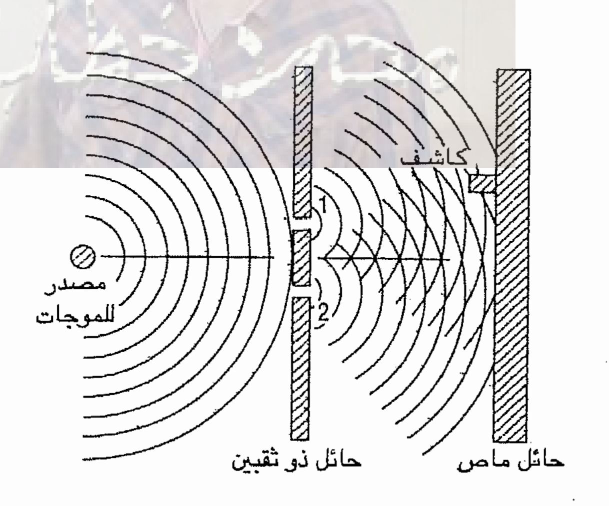
وفى تجربته، وضع يانج مصدراً للضوء أمام حائل، وصنع ثقبين بالحائل لينفذ من خلالهما الضوء، ووضع شاشة خلف هذا الحائل، وعندما سلط يانج ضوء المصدر على الحائل ذى الثقبين، حصل على أحد أشكال تداخل الضوء **interference**.

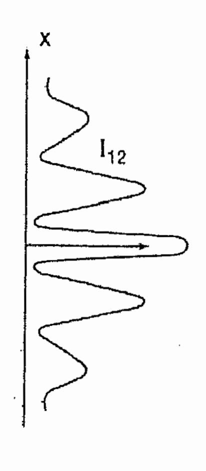


والمعلوم أن نموذج التداخل هو السمة المميزة للموجات. فالموجات بوسعها أن تتداخل مع بعضها البعض، وهو ما لا تفعله الجسيمات. أما ريتشارد فينمان فقد اعتبر أن النتيجة التي أسفرت عنها تجربة الثقب المزدوج ليانج – كما يتضح في حالة الإلكترونات وغيرها من حالات الكم التي يمكن حصرها – بالغة الأهمية، حتى إنه خصص معظم الفصل الأول من الجزء الثالث لمؤلفه الدراسي الشهير محاضرات فينمان في الفيزياء Feynman Lectures on Physics لهذا النوع من التجارب[٣]. وكان يعتقد أن نتيجة تجربة الشق المزدوج هي السر الرئيسي في ميكانيكا الكم. وشرح فينمان في كتابه فكرة تداخل الموجات في مقابل عدم تداخل الجسيمات باستخدام طلقات الرصاص. فلنفرض بندقية تطلق الرصاص عشوائياً على حاجز ذي ثقبين ؛ نحصل على النموذج الناتج الذي يوضحه الشكل التالي .



أما إذا مرت موجات الماء من خلال حاجز ذى ثقبين، فينتج الشكل التالى .
هنا يحدث التداخل، مثلما يحدث فى تجربة يانج باستخدام الضوء، بسبب أن لدينا موجات كلاسيكية. إذ ربما تضاف سعتا موجتين لبعضهما، ليسفر ذلك عن نشوء قمة على الحائل، أو قد تتداخلان على نحو هدام، لينتج قاع trough ولذلك تثبت تجربة يانج أن الضوء يتكون من موجات. لكن هل الضوء حقًا موجة؟





مازالت الخاصية المزدوجة للضوء بين كونه موجة، وكونه تيارًا من الجسيمات سمة مهمة للفيزياء حتى فى القرن الواحد والعشرين. أما ميكانيكا الكم التى تم تطويرها فى عشرينيات وثلاثينيات القرن العشرين، فإنها دعمت فى الواقع الرأى القائل بأن الضوء يمتلك الخاصيتين الجسيمية والموجية على حد سواء. وذكر لويس دى برولى Louis de Broglie الفيزيائى الفرنسى فى عام ١٩٢٤ أنه حتى الأجسام الفيزيائية مثل الإلكترونات وغيرها من الجسيمات تمتلك الخواص الموجية. وأثبتت التجارب صحة وجهة نظره. وأثناء استنتاج ألبرت أينشتين فى عام ١٩٠٥ للتأثير الكهروضوئى، وضع أسس النظرية التى تنص على أن الضوء يتكون من جسيمات،

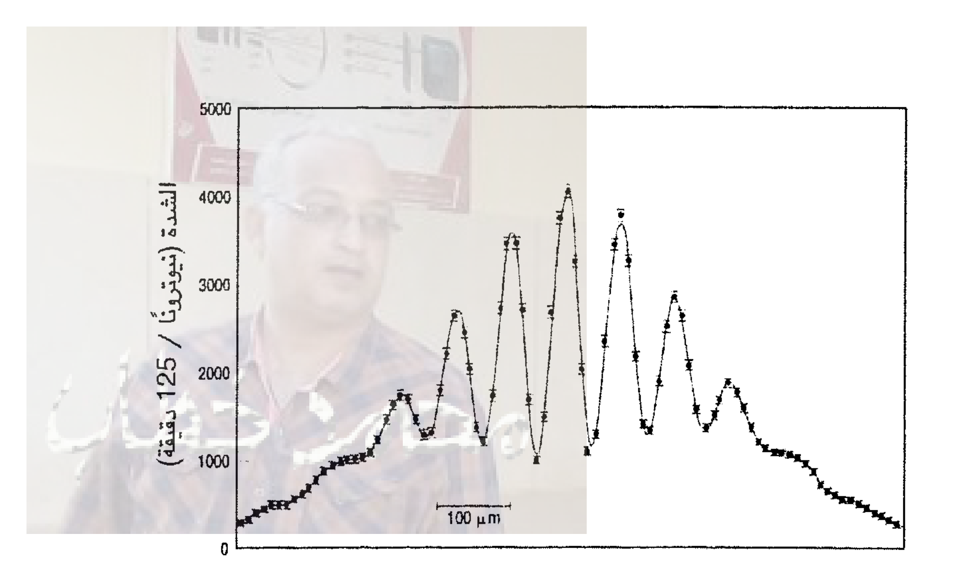
تماماً على غرار ما أكده نيوتن. وأصبح جسيم الضوء لدى أينشتين أخيراً يعرف باسم الفوتون، وهو الاسم المشتق من الكلمة اليونانية المقابلة للضوء. وطبقًا لنظرية الكم، يمكن للضوء أن يتخذ كلا الشكلين: الموجة والجسيم، وهذه الازدواجية - المتناقضة ظاهريا - تعد دعامة أساسية فى الفيزياء الحديثة. والأمر الملغز أن الضوء يتبدى فى كلا المظهرين: الخصائص الموجية من تداخل وحيود، والخصائص الجسيمية، المتمثلة فى تفاعل الجسيمات مع المادة. على سبيل المثال فإن شعاعين من الضوء يتداخلان معًا على نحو يشابه إلى حد كبير موجتين صوتيتين تنبعثان من جهازى تكبير صوتى، وعلى الجانب الآخر، يتفاعل الضوء مع المادة بالطريقة نفسها التى تتم فى حالة الجسيمات فقط، كما يحدث فى حالة التأثير الكهروضوئى.

وقد أوضحت تجربة يانج أن الضوء يتكون من موجات، لكننا نعلم أيضًا أن الضوء، على نحو ما، عبارة عن جسيمات: فوتونات. وفى القرن العشرين، أعيد إجراء تجربة يانج باستخدام ضوء بالغ الضعف - الضوء الناتج كفوتون واحد فى كل مرة - وبالتالى، لم يكن من المحتمل على الإطلاق وجود عدة فوتونات فى جهاز التجربة فى الوقت نفسه. الأمر المثير للذهول هو ظهور نموذج التداخل نفسه مع انقضاء الزمن الكافى حتى تتمكن الفوتونات فى كل مرة من التراكم على الشاشة. ما الذى كان يتداخل معه كل فوتون، إذا كان وحيداً فى الجهاز التجريبى؟ يبدو أن الإجابة لابد أنها: يتداخل مع نفسه. بأحد المعانى، أن كل فوتون نفذ من الفتحتين، وليس من فتحة واحدة، وعند ظهوره على الجانب الآخر، تداخل مع نفسه.

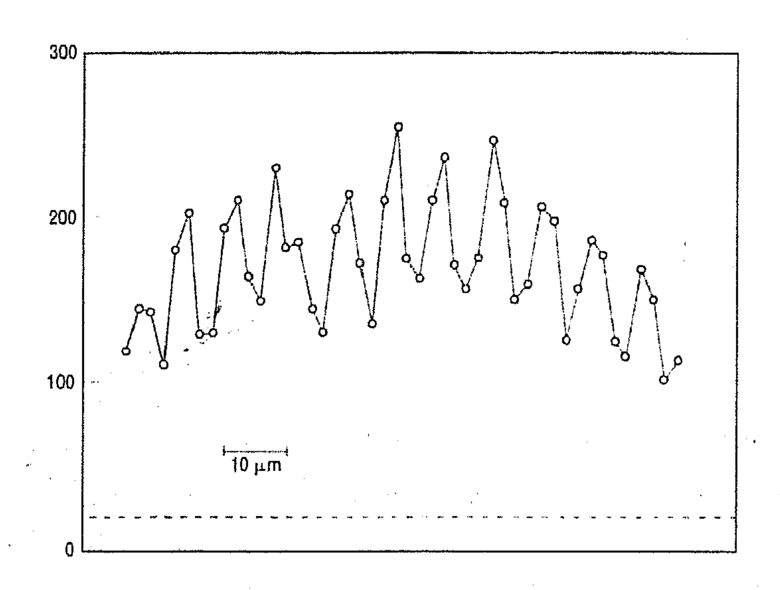
وتم إجراء تجربة يانج باستخدام الكثير من الكينونات التى نضعها فى عداد الجسيمات: الإلكترونات منذ خمسينيات القرن العشرين، والنيوترونات فى سبعينيات القرن العشرين، والذرات منذ الثمانينيات. وفى كل حالة: حدث نفس نموذج التداخل. هذه النتائج أثبتت مبدأ دى برولى، الذى يؤكد أن الجسيمات أيضًا تبدى ظواهر موجية. وكمثال على ذلك، فى عام ١٩٨٩ ، أجرى تونوميورا A. Tonomura وزملاؤه تجربة الشق المزدوج باستخدام الإلكترونات. والأشكال التالية توضح النتائج التى توصلوا إليها: وهى تبين بجلاء نموذج التداخل .



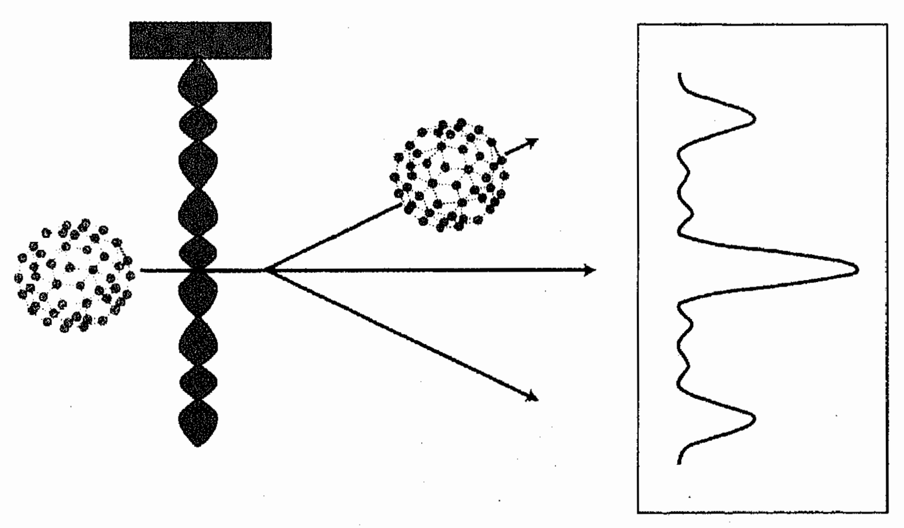
وقد توصل أنطون زايلنجر وزملاؤه إلى النموذج نفسه باستخدام النيوترونات التى تتحرك فقط بسرعة ٢ كيلو متر/ ثانية وذلك فى عام ١٩٩١ ، والشكل التالى يوضح نتائجهم.



وأمكن التوصل إلى نموذج مماثل باستخدام الذرات، وتبين من ذلك أن الخاصية الازدواجية بين الجسيمات والموجات تؤكد نفسها حتى للكينونات الأكبر.



وفى جامعة فيينا التى كان يعمل بها شرودنجر وماخ **Mach** تقدم أنطون زايلنجر وزملاؤه خطوة أبعد، إذ زادوا من معرفتنا بالنظم الكمية لتشمل كينونات لم تكن لتندرج بالضرورة فى عالم ما صغير جدا. (رغم أنه يتعين الإشارة إلى أن الفيزيائيين يعلمون أن بعض النظم كبيرة الحجم، مثل الموصلات الفائقة، يندرج سلوكها فى إطار ميكانيكا الكم). والجدير بالذكر أن كرة الباكى **bucky** عبارة عن جزىء يتكون من ٦٠ أو ٧٠ ذرة كربون مرتبة فى تركيب يماثل قبة جيوديسية مجوفة. واكتسبت هذه الكرات شهرتها من باكمنستر فولر **Buckminster Fuller** بعد إطلاق اسمه عليها. ويعد الجزىء الذى يتكون من ٦٠ ذرة كينونة كبيرة نسبيًا، مقارنة بذرة واحدة، ومع هذا، ظهر نموذج التداخل الملغز نفسه عندما أجرى زايلنجر وزملاؤه تجربتهم. والشكل التالى يوضح ترتيب التجربة.



وفى كل حالة، نجد أن الجسيمات تصرفت كما لو أنها موجات. أيضًا تم إجراء هذه التجارب على جسيم واحد فى كل مرة، وما زال نموذج التداخل باقيًا. ما هو الشىء الذى كانت تتداخل معه هذه الجسيمات؟ الإجابة هى، بمعنى ما، أن كل جسيم لم ينفذ من فتحة واحدة، لكن من الفتحتين معًا، وبالتالى فإن الجسيم "يتداخل مع نفسه".

إن ما نشاهده هنا هو بيان جلى للمبدأ الكمى لتراكب الحالات. إذ ينص مبدأ التراكب على أن حالة جديدة لنظام يمكن أن تتألف من حالتين أو أكثر، على نحو يتيح للحالة الجديدة أن تشترك فى بعض خصائص كل الحالات المتحدة. فإذا كانت A,B تشيران إلى خاصيتين مختلفتين لجسيم، مثلاً أن يكون فى موضعين مختلفين، لذلك فإن تراكب الحالتين الذى يكتب على الصورة A+B، ينطوى على شىء مشترك سواء من الحالة A أو الحالة B. وعلى نحو خاص، فإن احتمالات الجسيم لاصفرية لأنه سيكون فى حالة من الحالتين، وليس فى مكان آخر، وذلك إذا تم رصد موضع الجسيم.

وفى حالة تجربة الشق المزدوج، فإن تجهيزات التجربة توفر للجسيم نوعاً خاصاً من التراكب: يكون الجسيم فى الحالة A عندما يمر خلال الفتحة A، ويكون فى الحالة B عندما يمر من الفتحة B. ويكون تراكب الحالتين هو توليف لـ "جسيم ينفذ من الفتحة A" مع "جسيم ينفذ من الفتحة B". ويتحد المساران، ويكون هناك بالتالى احتمالان غير صفريين، إذا أمكن ملاحظة الجسيمين، وبفرض إمكان ملاحظة الجسيم وهو ينفذ من خلال تجهيزات التجربة، تغدو فرصة رصده ٥٠٪ ماراً من الفتحة A وكذلك ٥٠٪ وهو يمر من الفتحة B. لكن إذا لم تتم ملاحظة الجسيم أثناء مروره فى تجهيزات التجربة، بل تم ذلك فقط فى نهايتها وهو يتجمع على الشاشة، فإن التراكب ينطبق خلالها حتى النهاية؛ بمعنى، أن الجسيم مر من كلا الفتحتين، وما أن وصل إلى نهاية تجهيزات التجربة تداخل مع نفسه. إن تراكب الحالتين هو اللغز الأكبر فى ميكانيكا الكم. وينطوى مبدأ التراكب فى داخله على فكرة التعالق.

ما هو التعالق ؟

التعالق هو تطبيق لمبدأ التراكب على نظام مركب يتكون من نظامين فرعيين أو أكثر. والنظام الفرعى هنا subsystem يتكون من جسيم منفرد. ولنبحث معا ما هو المقصود بقولنا إن الجسيمين متعالقان. لنفرض أن الجسيم الأول يمكن أن يكون فى حالة من الحالتين A أو C، وأن الحالتين تمثلان خاصيتين متعارضتين، مثلاً يوجد فى موضعين مختلفين. والجسيم الثانى، على الجانب الآخر، يمكن أن يتخذ إحدى الحالتين B أو D. مرة أخرى يمكن أن تمثل هاتان الحالتان خاصيتين متعارضتين، مثلاً أن يكون فى موضعين مختلفين. وتسمى الحالة AB الحالة الناتجة. وحين يكون النظام بأكمله فى الحالة AB ، فنحن نعرف أن الجسيم الأول فى الحالة A والجسيم الثانى فى الحال B. وبالطريقة نفسها فإن الحالة CD للنظام بأكمله تعنى أن الجسيم الأول فى الحالة C والجسيم الثانى فى الحالة D. والآن لنبحث الحالة CD+AB. وقد توصلنا إلى هذه الحالة بتطبيق مبدأ التراكب على نظام الجسيمين بأكمله. ويتيح مبدأ التراكب للنظام أن يتخذ توليفة من الحالات، وتسمى الحالة CD+AB للنظام بأكمله بحالة متعالقة. بينما الحالة الناتجة AB (وبالمثل CD) تشير إلى خصائص محددة للجسيمين الأول والثانى (تعنى، مثلا، أن الجسيم الأول فى الموضع A والجسيم الثانى فى الموضع B) فى حين أن حالة التعالق لا تفعل ذلك – نظرا لأنها تشكل تراكبا. ونقول فقط إن هناك احتمالات بإمكان ارتباط الجسيمين الأول والثانى، بمعنى إذا أمكن إجراء قياسات، لذلك إذا وجد الجسيم الأول فى الحالة A يلزم أن يكون الجسيم الثانى فى الحالة B؛ وبالطريقة نفسها إذا كان الجسيم الأول فى الحالة C، إذن يلزم أن يكون الجسيم الثانى فى الحالة D. وبوسعنا تقريبا أن نقول، عندما يتعالق الجسيمان الأول والثانى، فلا توجد وسيلة لتمييز أحدهما دون الرجوع إلى الآخر أيضا. وينطبق هذا إلى حد كبير حتى من خلال إمكاننا الإشارة لكل جسيم على حدة عندما يكونان فى الحالة الناتجة AB أو CD، وليس عندما يكونان فى حالة التراكب AB+CD. إذ إن تراكب حالتين ناتجتين هو الذى يؤدى إلى اكتشاف التعالق.



الفصل الرابع

ثابت بلانك

"قدم بلانك فكرة جديدة ، لم يتخيلها أحد من قبل، الفكرة الخاصة بالبنية الذرية للطاقة".

ألبرت أينشتين

ولدت نظرية الكم ، بتوابعها الغريبة فى عام ١٩٠٠، قبل ٣٥ عامًا من إثارة أينشتين وزملائه لتساؤلهم حول التعالق. وينسب ميلاد نظرية الكم إلى أعمال شخص فريد هو ماكس بلانك **Max Planck**.

وقد ولد ماكس بلانك فى كييل **Kiel** بألمانيا عام ١٨٥٨ ، وينحدر من سلسلة طويلة من القساوسة ورجال القانون والعلماء، وكان جده لأمه، وجده لأبيه أستاذين فى علم اللاهوت بجامعة جوتنجن، وكان أبوه ويلهلم بلانك أستاذًا فى القانون فى كييل، وزرع فى ابنه إحساسًا عميقًا بالمعرفة والتعلم. وكان بلانك هو طفله السادس فى الترتيب. أما أمه فقد انحدرت من سلسلة طويلة من القساوسة. وكانت الأسرة ثرية وتقضى عطلاتها السنوية على شواطئ بحر البلطيق وتسافر إلى إيطاليا والنمسا. وتبنت الأسرة الآراء الليبرالية، بخلاف كثير من الألمان فى ذلك الحين، فى معارضة لسياسات بسمارك **Bismarck**. وكان ماكس بلانك يرى أنه حتى أكثر ليبرالية من عائلته.

وأثناء دراسته، كان طالبًا مجدا وإن لم يكن ممتازًا– فلم يحتل أبدًا المركز الأول على فصله على الرغم من أن درجاته عمومًا كانت مرضية. وتجلت موهبته فى دراسة اللغات، والتاريخ، والموسيقى، والرياضيات، لكن لم يبد اهتمامًا قط بالفيزياء أو حتى تفوق فيها. كان طالبًا ذا ضمير يقظ يعمل بجد، لكن لم تظهر عليه عبقرية ملموسة. واتسم ببطء التفكير المنظم، وليس بسرعة الإجابة، وإذا بدأ فى مزاولة عمل ما يجد أن من العسير عليه أن يترك الموضوع وينتقل إلى موضوع آخر. وكان مثقفًا أميل إلى الكدح أكثر منه ذا موهبة طبيعية فى الدراسة بالمرحلة الثانوية. وكان كثيرًا ما يقول أنه لسوء الحظ لم ينل موهبة التفاعل السريع مع الحوافز الثقافية. وكان يتعجب دائمًا من قدرة الآخرين على مزاولة أكثر من عمل ثقافى. كان خجولا متحفظا، غير أنه حظى دائمًا بحب مدرسيه وزملائه الطلاب. وكان يرى فى نفسه أنه شخص على خلق، ملتزم فى أداء الواجبات، بالغ الأمانة، ويقظ الضمير. وشجعه أحد الأساتذة فى المرحلة الثانوية على دراسة التفاعل الهارمونى الذى كان يعتقد بوجوده بين الرياضيات وقوانين الطبيعة. وهو الأمر الذى حفز ماكس على دراسة الفيزياء، واستمر على ذلك حتى التحاقه بجامعة ميونيخ.

وفى عام ١٨٧٨، اختار بلانك علم الديناميكا الحرارية كموضوع لأطروحته العلمية، التى أتمها فى عام ١٨٧٩ ، وتناولت دراسته مبدأين للديناميكا الحرارية الكلاسيكية: حفظ الطاقة، وزيادة الإنتروبى بمرور الزمن، الأمر الذى يميز جميع العمليات الفيزيائية القابلة للمشاهدة. واستخلص بلانك عدة نتائج محددة من مبادئ الديناميكا الحرارية وأضاف مقدمة منطقية مهمة: يتم الحصول على توازن مستقر عند نقطة الحد الأقصى للإنتروبى. وأكد أن الديناميكا الحرارية يمكن أن تسفر عن نتائج طيبة دون أى اعتماد على الفرضيات الذرية. وبالتالى يمكن دراسة أى نظام اعتمادًا على خصائصه الماكروسكوبية دون أن يعترى القلق أى عالم بما يحدث أو لا يحدث للمكونات الدقيقة للنظام: الذرات، والجزيئات، والإلكترونات... وما إلى ذلك .

ولا تزال قوانين الديناميكا الحرارية تحظى بأهمية بالغة فى الفيزياء؛ نظرًا لأنها تعالج الطاقة فى الأنظمة بأكملها. ويمكن مثلا استخدام هذه القوانين فى تعيين قدرة

آلة الاحتراق الداخلى، كما أن لها تطبيقات واسعة فى الهندسة وغيرها من المجالات. فالطاقة والإنتروبى مفهومان أساسيان فى الفيزياء، ولذلك قد يظن المرء أن أعمال بلانك لاقت استقبالاً حسنًا فى ذلك الحين. لكن هذا لم يحدث؛ فالأساتذة فى جامعتى ميونخ وبرلين- حيث كان بلانك يتلقى تعليمه لمدة عام- لم يتأثروا ببحثه. لم يعتقدوا أن هذا بحث يستحق الأهمية بما يكفى لينال صاحبه التقدير أو الاعتراف. وتهرب أحد الأساتذة من لقاء بلانك، حتى إنه لم يتمكن من تقديم نسخة له من رسالة الدكتوراه عند إعدادها للمناقشة. وفى النهاية حصل بلانك على درجة الدكتوراه وكان من حسن حظه تعيينه فى وظيفة أستاذ مشارك فى جامعة كيبل وتسلم منصبه عام ١٨٨٥، حيث كان لا يزال لدى أبيه عدد من الأصدقاء يمكنهم مساعدته. وعلى الفور سعى لإثبات جدارة عمله وكذلك الديناميكا الحرارية ككل. وشارك فى مسابقة نظمتها جامعة جوتنجن لتحديد طبيعة الطاقة، وفاز البحث المقدم من بلانك بالمركز الثانى- إذ لم يفز أحد بالمركز الأول. حينئذ أيقن أنه يستطيع الفوز بالمركز الأول إذا لم يتضمن بحثه أى انتقاد لأحد أساتذة جوتنجن. ومع ذلك تركت المكافأة التى فاز بها انطباعًا طيبًا لدى أساتذة الفيزياء بجامعة برلين، فمنحوه عام ١٨٨٩ وظيفة أستاذ مشارك بكليتهم.

وبمرور الوقت ، بدأ العاملون فى الفيزياء النظرية ينظرون بتقدير إلى قوانين الديناميكا الحرارية مع ما فيها من معالجات لمفاهيم الطاقة والإنتروبى، وأضحت أعمال بلانك أكثر انتشاراً. وفى الواقع كان زملاؤه فى برلين يستعيرون رسالته العلمية مرات كثيرة حتى إنه خلال فترة قصيرة أخذت أوراقها تتمزق. وفى عام ١٨٩٢ ترقى بلانك إلى منصب أستاذ كامل فى برلين، وبحلول عام ١٨٩٤ صار عضواً عاملاً بأكاديمية العلوم فى برلين.

ومع نهاية القرن التاسع عشر، حازت الفيزياء مكانتها كمنهج علمى متكامل، ومن خلالها باتت كل تفسيرات الظواهر والنتائج المعملية تقدم على نحو مقبول. كانت هناك الميكانيكا وهى النظرية التى بدأت على يد جاليليو بتجربته ذائعة الصيت الخاصة بإسقاط الأجسام من قمة برج بيزا المائل، واستكملها العبقرى إسحق نيوتن بحلول القرن الثامن عشر، تقريبًا قبل قرنين من ظهور بلانك. وقد حاولت الميكانيكا ونظرية

الجاذبية الأرضية، اللتان سارتا معًا يدًا بيد، تفسير حركة الأجسام التى نراها فى حياتنا اليومية وصولاً إلى الأجسام الكبيرة مثل الكواكب والقمر. وتشرح النظرية كيفية تحرك الأجسام، وأن القوة هى حاصل ضرب الكتلة فى العجلة، وفكرة أن الأجسام المتحركة تكتسب قصوراً ذاتيًا، وأن للأرض قوة جذب تؤثر فى جميع الأجسام. وقد علّمنا نيوتن أن مدار القمر حول الأرض هو فى واقع الأمر(سقوط) ثابت للقمر على الأرض، تفرضه قوى التجاذب بين الكتلتين اللتين تؤثران إحداهما فى الأخرى.

واشتملت الفيزياء أيضًا على النظرية الكهربية، والمغناطيسية الكهربية التى طورها أمبير Ambere، وفاراداى Faraday وماكسويل Maxwell. وتضمنت هذه النظرية فكرة المجال، حيث إن أى مجال مغناطيسى أو كهربى لا يمكن رؤيته أو سماعه أو الإحساس به، لكنه يتضح من خلال تأثيره فى الأجسام. وطور ماكسويل معادلات تصف بدقة المجال الكهرومغناطيسى واستنتج أن موجات الضوء عبارة عن موجات للمجال الكهرومغناطيسى. وفى عام ١٨٣١، أنشأ فراداى أول دينامو، يقوم بتوليد الكهرباء على أساس مبدأ الحث الكهرومغناطيسى، وعن طريق دوران قرص نحاسى بين قطبى مغناطيس كهربى، أمكنه توليد الكهرباء.

وفى عام ١٨٨٧، أثناء سنوات تكوين بلانك، أجرى هينريتش رودولف هيرتز Heinrich Rudolf Hertz (١٨٥٧- ١٨٩٤) تجاربه التى أسفرت عن اكتشاف موجات الراديو. وبالمصادفة، لاحظ أن قطعة من الزنك مضاءة بأشعة فوق بنفسجية أصبحت مشحونة كهربيًا. وهكذا بدون أن يعرف، اكتشف التأثير الكهروضوئى، الذى يربط بين الضوء والمادة. وفى الوقت نفسه تقريبًا، افترض لودفيج بولتزمان (١٨٤٤- ١٩٠٦) Ludwig Boltzmann أن الغازات تتألف من جزيئات وعالج سلوكها باستخدام طرق إحصائية. وفى عام ١٨٩٧ ، حدث واحد من أكثر الاكتشافات العلمية أهمية: وهو اكتشاف وجود الإلكترون على يد طومسون J.J.Thomson .

وفى ثنايا كل هذه الأجزاء المختلفة من الفيزياء الكلاسيكية كانت الطاقة تعد فكرة حاسمةً لها جميعًا. ففى الميكانيكا: نصف حاصل ضرب الكتلة فى مربع السرعة

يساوى طاقة الحركة (جدير بالذكر أن كلمة حركة بالإنجليزية مستمدة من الكلمة اليونانية kinesis)؛ كما كان هناك نوع آخر للطاقة يسمى طاقة الوضع. فأى صخرة على جرف مرتفع تمتلك طاقة وضع يمكن تحويلها فى الحال إلى طاقة حركة بمجرد دفع الصخرة قليلاً لتسقط من حافة الجرف. والحرارة أيضًا طاقة كما تعلمنا من الفيزياء فى المدارس الثانوية. والإنتروبى عبارة عن نوعية ذات صلة بالعشوائية، ونظراً لأن العشوائية تزداد دائمًا، فإن لدينا قانون تزايد الإنتروبى، كما يعلم تماما أى شخص يحاول إعادة وضع دمى الأطفال فى مكانها المعتاد.

لذلك كانت كل الأسباب مهيأة كى يتقبل العاملون فى الفيزياء إسهامات بلانك المتواضعة فى نظريتى الطاقة والإنتروبيا، وهذا ما حدث بالفعل فى ألمانيا مع أفول القرن التاسع عشر، إذ تم الاعتراف بأعمال بلانك فى الديناميكا الحرارية، وأصبح أستاذًا بجامعة برلين. وفى غضون تلك الفترة، شرع يعمل فى مسألة مثيرة للاهتمام. كانت الأبحاث تجرى فيما يعرف باسم إشعاع الجسم المعتم black-body radiation. وقد أفضى الاستنتاج المنطقى بالتضافر مع الفيزياء الكلاسيكية إلى نتيجة مؤداها: أن الإشعاع الصادر من جسم ساخن يكون فى أقصى توهجه عند الطرف الأزرق أو البنفسجى من الطيف، لذلك يمكن لجذوة مشتعلة فى مدفأة تتوهج باحمرار، أن تؤدى إلى انبعاث أشعة فوق بنفسجية، وكذلك أشعة سينية x-rays، وأشعة جاما gamma. غير أن هذه الظاهرة المعروفة باسم كارثة الأشعة فوق البنفسجية ultra-violet catastrophe لا تحدث فعليًا فى الطبيعة، ولم يستطع أى شخص تفسير هذه الحقيقة الشاذة، منذ تنبأت النظرية بتركيب مستويات الطاقة وعلاقتها بالإشعاع. وفى ١٤ ديسمبر ١٩٠٠، تقدم ماكس بلانك ببحث فى اجتماع للجمعية الألمانية للفيزياء. وكانت النتائج التى توصل إليها بلانك محيرة للغاية حتى إنه نفسه وجد صعوبة فى تصديقها. إلا أن هذه النتائج كانت هى التفسير المنطقى الوحيد لحقيقة عدم حدوث كارثة الأشعة فوق البنفسجية. وأوضحت أطروحة بلانك أن مستويات الطاقة هى مستويات كمية، فالطاقة لا تتنامى أو تضمحل على نحو مستمر، لكنها تكون دائمًا مضاعفات "كم – كوانتم" أساسى، أى كمية محددة أعطاها بلانك الرمز hv حيث v هو التردد المميز للنظام

موضع الدراسة، بينما h ثابت أساسي وهو المعروف حاليًا باسم ثابت بلانك (يساوى ٦,٦٢٦٢×١٠–٣٤ جول – ثانية).

وينص قانون رايلى – جينز Rayleigh - Jeans فى الفيزياء الكلاسيكية على أن توهج إشعاع الجسم المعتم لا يكون محدوداً للأشعة فوق البنفسجية عند الطرف الأقصى لألوان الطيف، وبالتالى تنتج كارثة الأشعة فوق البنفسجية بيد أن الطبيعة لا تسلك هذا السبيل.

وطبقًا لفيزياء القرن التاسع عشر (أعمال ماكسويل وهيرتز)، فإن أى شحنة متذبذبة ينجم عنها إشعاع، وتردد هذه الشحنة المتذبذبة (التردد هو معكوس الطول الموجى) ويرمز له بالرمز ν ، بينما تتخذ الطاقة الرمز E . وافترض بلانك صيغة لمستويات الطاقة على متذبذب ماكسويل – هيرتز يعتمد على ثابت بلانك. وهذه الصيغة على النحو التالى:

$$E = 0, h\nu, 2h\nu, 3h\nu, 4\nu ...,$$

أو بشكل عام = n h ν ، حيث n عدد صحيح غير سالب .

ونجحت صيغة بلانك كأنها السحر، فقد نجحت فى تفسير الطاقة والإشعاع داخل تجويف جسم معتم بتوافق تام مع منحنيات الطاقة التى حصل عليها الفيزيائيون من خلال التجارب. وكان السبب وراء ذلك أن الطاقة تم النظر إليها آنذاك بأنها تنتقل خلال حزمات (جمع حزمة – المترجم) منفصلة، بعضها كبير وبعضها صغير، اعتماداً على تردد الذبذبة. والآن عندما تكون الطاقة المعينة لأى جسم متذبذب (المشتقة بوسائل أخرى) أصغر من حجم حزمة الطاقة التى تتيحها صيغة بلانك، تنخفض شدة الإشعاع، بدلاً من الصعود إلى المستويات العليا من كارثة الأشعة فوق البنفسجية.

وهكذا وضع بلانك الكوانتم موضع التنفيذ. ومنذ تلك اللحظة فصاعداً، لم تعد الفيزياء إلى ما كانت عليه. وعلى مدى العقود التالية، تم التوصل إلى كثير من التأكيدات بأن الكوانتم (الكم) مفهومة حقا بهذه الطريقة، وأن الطبيعة تعمل حتى بهذه الكيفية، على الأقل فى عالم الجسيمات الدقيقة للذرات، والجزيئات، والإلكترونات، والنيوترونات، والفوتونات، وما أشبه.

وظل بلانك نفسه حائراً إلى حد ما أمام اكتشافه الخاص ومن المحتمل ألا يكون قد فهم اكتشافه تماما على المستوى الفلسفي. ونجحت الحيلة، وتوافقت المعادلات مع المعطيات، إلا أن السؤال: "لماذا الكوانتم؟" لم يتوقف طرحه عليه وحده فقط بل لا تزال أجيال الفيزيائيين والفلاسفة في المستقبل يطرحونه حتى الآن.

كان بلانك مواطنًا ألمانيًا متحمسًا لوطنه يؤمن بالعلوم الألمانية، وكان عاملا فعالا في استقدام ألبرت أينشتين إلى برلين عام ١٩١٤، وفي دعم انتخاب أينشتين عضواً بأكاديمية العلوم البروسية. وعندما تولى هتلر السلطة حاول إقناعه بتغيير قراره الخاص بالتخلص من وظائف الأكاديميين اليهود، غير أن بلانك لم يترك وظيفته قط كنوع من الاحتجاج مثلما فعل بعض الأكاديميين غير اليهود. واستمر باقيًا في ألمانيا وخلال حياته واصل إيمانه بدعم العلم في وطنه.

وتوفي بلانك في عام ١٩٤٧ . ومنذ ذلك الحين نضجت نظرية الكم، وأحرزت نمواً ملموساً لتغدو النظرية المقبولة للقانون الفيزيائي في عالم الجسيمات الدقيقة. أما بلانك نفسه، الذي قاد عمله واكتشافه للكمات إلى بدء ثورة في العلوم، فلم يكن عقله يتقبلها تماماً. كانت تبدو عليه الحيرة من الاكتشافات التي قام بها، وبقي دائما داخل أعماقه فيزيائيًا كلاسيكًا، بمعنى أنه لم يشارك كثيراً في الثورة العلمية التي بدأت على يديه. لكن دنيا العلوم كانت قد انطلقت إلى الأمام بزخم هائل.


محمد خطاب



الفصل الخامس

مدرسة كوبنهاجن

"إن اكتشاف فعل الكوانتم لا يوضح فقط المحدودية الطبيعية للفيزياء الكلاسيكية، لكن هذا الاكتشاف عندما ألقى ضوءًا جديدًا على المشكلة الفلسفية القديمة عن الوجود الموضوعى للظواهر مستقلا عن ملاحظاتنا - فإنه يواجهنا بموقف فى العلوم الطبيعية مازال غير معلوم حتى الآن ".

نيلز بوهر

ولد نيلز بوهر Niels Bohr عام ١٨٨٥ فى كوبنهاجن، فى قصر مشيّد من القرن السادس عشر بالشارع الذى يقع به البرلمان الدانمركى من الجهة الأخرى. وتعاقب على ملكية هذا المبنى المتميز عدد من الأثرياء والمشاهير، بما فيهم – بعد عقدين من ميلاد بوهر – ملك اليونان جورج الأول.

واشترى القصر دافيد أدلر، جد بوهر من ناحية الأم، وهو مصْرفى وعضو بالبرلمان الدانمركى. وانحدرت أمه، ألين أدلر، من أسرة يهودية إنجليزية استقرت بالدانمرك. ومن جانب أبيه، ينتمى نيلز إلى عائلة عاشت بالدانمرك لأجيال عديدة، هاجرت إليها فى أواخر القرن الثامن عشر من دوقية دوتشى الكبرى فى ميكلنبرج فى القطاع الناطق بالدانمركية من ألمانيا، وكان أبوه، كريستيان بوهر، طبيبا وعالمًا تم ترشيحه لجائزة نوبل لأبحاثه فى مجال التنفس.

كما كان دافيد أدلر يمتلك مزرعة تبعد نحو عشرة أميال عن كوبنهاجن، وتربى نيلز وسط بيئة مرفهة سواء بالمدينة أو الريف. والتحق نيلز بالمدرسة فى كوبنهاجن وحاز لقب "الولد البدين"، حيث كان صبيا ضخم الجثة كثيراً ما يتصارع مع أصدقائه، وكان تلميذا مجتهداً، رغم عدم إحرازه المركز الأول فى فصله.

كان والدا بوهر يتيحان لأبنائهما تطوير مواهبهم لأقصى حد. وكان هارالد شقيق بوهر الأصغر يبدى على الدوام ميلا إلى الرياضيات، وبمرور الوقت، أصبح رياضياً شهيراً، وبرز نيلز كباحث شغوف حتى عندما كان صغيرا جداً. وأثناء دراسته، قام نيلز بوهر بتنفيذ مشروع يبحث فى التوتر السطحى للماء بملاحظة ذبذبات صنبور. وتم التخطيط للمشروع وتنفيذه بجودة عالية حتى إنه أحرز بسببه ميدالية ذهبية من أكاديمية العلوم بالدانمرك.

وفى الجامعة، افتتن بوهر بشكل خاص بالأستاذ كريستيان كريستيانسن الذى كان فيزيائيًا دانمركيا شهيراً فى ذلك الحين. ونشأت بين الأستاذ والطالب علاقة إعجاب متبادل. وفى وقت لاحق كتب بوهر أنه كان محظوظاً بشكل خاص عندما أصبح تحت إشراف كريستيانسن: "فيزيائى أصيل عميق التفكير، وذو موهبة راقية". وفى المقابل كتب كريستيانسن بدوره إلى بوهر عام ١٩١٦: "لم أقابل فى حياتى قط شخصاً يشبهك ينفذ إلى أعماق كل أمر، وأيضاً يمتلك من الجهد ما يمكنه من إجراء أى بحث بكل جوانبه، بالإضافة إلى أنه بالغ الاهتمام بكل ما فى الحياة"[٤].

كما تأثر بوهر بأعمال الفيلسوف الدانمركى الرائد هارالد هوفدنج **Harald Hoffding**. وقد تعرف عليه بوهر قبل فترة طويلة من دخوله الجامعة، منذ كان صديقًا لأبيه، إذ كان هوفدنج يلتقى مع عدد آخر من المثقفين الدانمركيين فى قصر بوهر لتبادل الآراء، وكان كريستيان بوهر يسمح لابنيه نيلز وهارالد بحضور هذه النقاشات. وفيما بعد، غدا هوفدنج بالغ الاهتمام بالمضامين الفلسفية لنظرية الكم التى طورها نيلز بوهر. وفى المقابل، طرح البعض أن صياغة بوهر لمبدأ التكاملية فى الكوانتم (الذى سيناقش فى فصل تال) قد تأثرت بفلسفة هوفدنج.

وواصل بوهر دراسته لنيل الدكتوراه فى الفيزياء من الجامعة، وفى عام ١٩١١ كتب أطروحته عن النظرية الإلكترونية للفلزات. وبحسب النموذج الذى افترضه، اعتبر الفلزات مثل غاز من الإلكترونات يتحرك بشكل أو بآخر بحرية خلال الجهد الناشئ عن الشحنات الموجبة داخل الفلز. وهذه الشحنات الموجبة هى نويّات ذرات الفلز، المرتبة فى شبكة. ولم تستطع النظرية طرح تفسير لكل شيء، وجاءت محدوديتها نتيجة تطبيق الأفكار الكلاسيكية – أكثر من أفكار الكوانتم الوليدة – على سلوك هذه الإلكترونات فى الفلز. وقد أحرز نموذج بوهر نجاحًا طيبًا حتى إن مناقشة رسالته للدكتوراه اجتذبت كثيرًا من الاهتمام وامتلأت قاعة المناقشة عن آخرها. وقد ترأس البروفيسور كريستيانسن لجنة المناقشة. وأعرب فى ملاحظاته عن أسفه لعدم ترجمة الرسالة إلى لغة أجنبية أخرى، نظرًا لقلة عدد الدانمركيين الذين يفهمون فى الفيزياء، وفيما بعد أرسل نيلز نسخا من الرسالة إلى عدد من البارزين فى الفيزياء الذين استخدم أعمالهم كمراجع لرسالته، بما فيهم ماكس بلانك. ولسوء الحظ لم يرد منهم سوى عدد قليل، فلم يكن أحد منهم يعرف اللغة الدانمركية. وفى عام ١٩٢٠، حاول بوهر ترجمة الرسالة إلى الإنجليزية، إلا أن هذا المشروع لم يكتمل قط.

وبعد انتهائه من بحثه، ذهب بوهر إلى إنجلترا فى منحة زمالة ما بعد الدكتوراه بدعم من مؤسسة كارلسبرج الدانمركية. وأمضى هناك عاما تحت إشراف طومسون J.J.Thomson فى معمل كافندش Cavendish بجامعة كامبردج. وكان هذا المعمل من بين مراكز الفيزياء التجريبية الرائدة على مستوى العالم، وتولى إدارته قبل طومسون كل من ماكسويل ورايلى. ومن هذا المعمل، وعلى مدى سنوات نال جائزة نوبل نحو عشرين باحثا عملوا به.

وكان طومسون، الذى حصل على جائزة نوبل عام ١٩٠٦ لاكتشافه الإلكترون، يتميز بالطموح المفرط. فدائما كان يتم إخفاء الفيلم الذى يصوره أثناء التجارب وإلا انتزعه لفحصه قبل تجفيفه، تاركًا آثار أصابعه عليه وقد لطخت الصور. وكان يقود حملة عنيفة لإعادة كتابة الفيزياء على أساس الإلكترون، ويتجاوز فى اندفاع الأعمال المؤثرة لسلفه ماكسويل.

وانهمك بوهر يعمل بنشاط فى هذا المعمل، لكنه غالبا ما واجهته مصاعب كتشكيل الزجاج بالنفخ لصنع تجهيزات خاصة. وكانت الأنابيب تتحطم بسببه، وينتابه الارتباك للتعامل بلغة غير مألوفة لديه. وحاول تحسين لغته الإنجليزية بقراءة تشارلز ديكنز Dickens، مستخدما المعجم للكشف عن كل كلمة غريبة عليه، علاوة على أنه لم يكن من السهل التعامل مع طومسون. وكان البرنامج الذى أعده طومسون لبوهر مصمما باستخدام أنابيب أشعة الكاثود (المهبط)، وكان طريقا مسدودا لم يسفر عن أية نتائج. ووجد بوهر خطأ فى حسابات طومسون، إلا أن طومسون لم يكن بالشخص الذى يتقبل النقد. إذ لم يكن يعنيه تصحيح أفكاره، أما بوهر - بإنجليزيته الضعيفة - فلم يستطع أن يعبر عن رأيه بطريقة مفهومة.

وفى كامبردج، التقى بوهر باللورد جيمس رزرفورد (1871- 1938) James Rutherford، الذى نال شهرته عن عمله الرائد فى الإشعاع، واكتشاف النواة، وطرْحه نموذجًا للذرة. وكان بوهر مهتمًا بالانتقال إلى مانشستر للعمل مع رزرفورد، التى لم تكن نظرياته حتى ذلك الحين قد لاقت قبولا واسع النطاق. وأعرب رزرفود عن ترحيبه به، إلا أنه اقترح عليه أن يحصل على تصريح من طومسون بالسفر. أما طومسون - الذى لم يكن من المؤمنين بنظرية رزرفورد عن النواة - فقد كان أكثر سعادة بإخلاء سبيل بوهر.

وفى مانشستر، شرع بوهر فى دراساته التى جلبت له الشهرة فى النهاية. وبدأ فى تحليل خواص الذرات فى ضوء نظرية رزرفود. ورتب له رزرفود العمل فى المسألة التجريبية الخاصة بتحليل امتصاص جسيمات ألفا Alpha فى الألومنيوم. وكان بوهر يستمر بالمعمل لساعات طويلة يوميًا، وكان رزرفورد يزوره مع باقى طلابه دائمًا، مبديًا اهتمامًا كبيرًا بعمله. وبعد فترة، مع ذلك، تقدم بوهر لرزرفورد باقتراح قائلاً بأنه يفضل أن يعمل فى الفيزياء النظرية. ووافق رزرفورد على ذلك ومكث بوهر بمنزله، يجرى الأبحاث مستخدما القلم الرصاص والورق، ونادراً ما كان يذهب إلى المعمل. وكان سعيداً لعدم اضطراره لرؤية أى شخص. وفيما بعد قال "لا يوجد هناك من يعرف الكثير".

وفى بحثه اشتغل بوهر على الإلكترونات وجسيمات ألفا، وأنتج نموذجًا يصف الظواهر التى كان يلاحظها هو والفيزيائيون التجريبيون. ولم يجد أن النظرية الكلاسيكية ناجحة هنا، لذلك أقدم بوهر على خطوة جريئة: طبق القيود الكمية على تلك الجسيمات. واستخدم بوهر ثابت بلانك بطريقتين فى نظريته الشهيرة عن ذرة الهيدروجين. فى الأولى: لاحظ أن كمية الحركة الزاويّة للإلكترون فى مداره، طبقًا لنموذجه عن ذرة الهيدروجين لها نفس الأبعاد المطابقة لثابت بلانك. وأفضى به هذا إلى افتراض أن كمية الحركة الزاوية للإلكترون فى مداره لابد أن تكون أحد مضاعفات ثابت بلانك مقسومة على 2π ، أى أن:

$$mvr = h/2\pi,\ 2\,(h/2\pi),\ 3\,(h/2\pi),$$

حيث يرمز الطرف الأيسر إلى التعريف الكلاسيكى لكمية الحركة الزاوية (m هى الكتلة، v هى السرعة، r هى نصف قطر المدار). وهذا الفرض الذى مؤداه أن كمية الحركة الزاوية هى مقدار كمى، جعل بوهر يستنتج مباشرة أن طاقة الذرة مقدار كمى.

وفى الثانية: افترض بوهر أن ذرة الهيدروجين أثناء هبوطها من مستوى للطاقة إلى مستوى أدنى، فإن الطاقة المنبعثة منها تكون فى صورة فوتون أينشتينى واحد. وكما سنرى فيما بعد، فإن أصغر كم للطاقة فى شعاع ضوئى، بحسب أينشتين، هو hv حيث h ثابت بلانك، v هى التردد أو عدد الذبذبات فى الثانية الواحدة. ومع هذا التطور، وكذلك افتراضه لكمية الحركة الزاوية استخدم بوهر نظرية الكم عند بلانك لتفسير ما يحدث داخل الذرة. وكان هذا يعد اختراقًا عظيما فى الفيزياء.

وانتهى بوهر من ورقته حول جسيمات ألفا والذرة بعد مغادرته لمانشستر ورجوعه إلى كوبنهاجن. ونُشرت الورقة فى عام ١٩١٣، لتصبح مؤشرا على انتقال عمله إلى نظرية الكم ولمسألة التركيب الذرى. ولم ينس بوهر قط أن ما أدى به إلى صياغة نظريته عن الكوانتم فى الذرة كان اكتشاف رزرفورد للنواة. وفى وقت لاحق وصف رزرفورد بأنه بمثابة أب ثان له.

وبمجرد عودة بوهر إلى الدانمـرك، حصل على منصب فى معهد التكنولوجيا الدانمركي، وتزوج من مرجريت نورلند فى عام ١٩١٢ ، ولبثت بجانبه طيلة حياته، وكانت دافعًا فى تشكيل جماعة الفيزياء التى تأسست فى كوبنهاجن على يد زوجها.

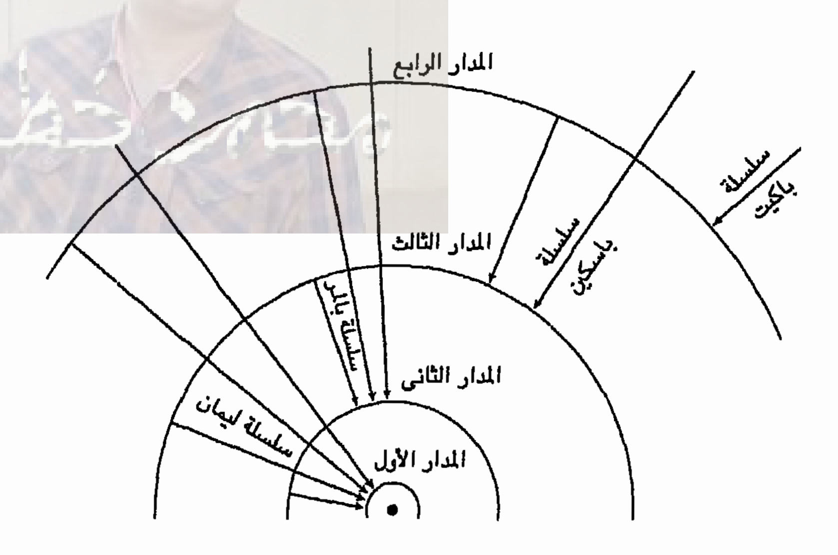
وفى ٦ مارس عام ١٩١٣، أرسل بوهر لرزرفورد الفصل الأول من بحثه الخاص بتركيب الذرات. وطلب من معلمه السابق أن يقدم هـذا البحث إلى المجلة الفلسفية Philosophical Magazine لنشره. وكانت هذه النسخة سببًا فى انطلاقه من فيزيائى شاب أحرز بعض التطورات المهمة فى الفيزياء ليغدو شخصية بارزة عالميًا فى مجال العلوم. كان الاختراق الذى حققه بوهر باكتشافه يجعل من المستحيل وصف الذرة وفقًا للمعطيات الكلاسيكية، وبالتالى كانت كل إجابات الأسئلة عن الظواهر الذرية تحتم أن تأتى من نظرية الكم.

كانت جهود بوهر تهدف فى البداية إلى فهم أبسط الذرات جميعًا وهى ذرة الهيدروجين. وبمرور الوقت تناول المسألة، كانت الفيزياء فعليا قد توصلت إلى معرفة أن هناك سلسلة محدودة من الترددات التى تبث من خلالها ذرة الهيدروجين الإشعاع. وهذه السلاسل المعروفة جيداً هى ريدبرج Rydberg، وبالمر Balmer، وليمان Lyman، وباسكين Paschen، وبراكت Bracket، كل واحدة منها تغطي جزءًا مختلفا من طيف الإشعاع لذرات الهيدروجين المستثارة، بداية من الأشعة فوق البنفسجية مرورًا بالضوء المرئى حتى الأشعة تحت الحمراء. وسعى بوهر ليجد معادلة تتمكن من تفسير سبب انبعاث إشعاعات من ذرة الهيدروجين عند هذه الترددات بالتحديد وليس سواها.

ومن البيانات المتاحة لكل سلاسل الإشعاع لذرة الهيدروجين استنتج بوهر أن كل تردد ينبعث ينجم عن إلكترون يهبط من مستوى للطاقة فى الذرة إلى مستوى آخر، أدنى منه. وعندما ينتقل الإلكترون من مستوى معين إلى آخر، فإن الفرق بين الطاقة الأولى والثانية يتم انبعاثه فى صورة كم من الطاقة. وثمة صيغة رياضية تربط بين هذين المستويين للطاقة والكمات.

$$E_a - E_b = h \nu_{ab}$$

حيث Ea هى طاقة مستوى الإلكترون الذى يدور حول نواة ذرة هيدروجين، و E_b هى طاقة المستوى الذى ينتقل إليه الإلكترون من مستواه السابق، و h هو ثابت بلانك، و ν_{ab} V هو تردد كم الضوء المنبعث أثناء انتقال الإلكترون من مستوى الطاقة الأول إلى الثانى. ويتضح هذا من الشكل التالى:



لم يستطع النموذج البسيط الذى اقترحه رزرفورد للذرة أن يتفق تمامًا مع الواقع. فقد صيغ نموذج رزرفورد للذرة اعتمادا على الفيزياء الكلاسيكية. وإذا كانت الذرة على هذا الصورة البسيطة المتفقة مع هذا النموذج، لأفضى ذلك إلى عدم بقائها فى الوجود لأكثر من واحد على مائة مليون من الثانية. أما اكتشاف بوهر الفذ باستخدام ثابت بلانك فى إطار الذرة فقد أمكنه حل المشكلة على نحو باهر. والآن تفسر نظرية الكم جميع ظواهر الإشعاع الملحوظة لذرة الهيدروجين، التى ظلت حتى ذلك الحين تتسبب فى حيرة الفيزيائيين طيلة عقود.

وامتد بحث بوهر جزئيًا ليفسر مدارات وطاقات الإلكترونات فى عناصر أخرى، كما ساعدنا على فهم الجدول الدورى للعناصر، والروابط الكيميائية وغيرها من

الظواهر الأساسية. ويدأ على الفور استخدام نظرية الكم (الكوانتم) استخداما جيدا على نحو استثنائى. وغدا واضحًا أن الفيزياء الكلاسيكية لا يمكن تطبيقها بكفاءة فى دنيا الذرات والجزيئات والإلكترونات، وأن نظرية الكم هى المسار الصحيح الذى يتعين أن نأخذ به.

أما حل بوهر المبهر للتساؤل عن السلاسل المختلفة لخطوط الطيف فى إشعاع ذرة الهيدروجين فقد ترك السؤال التالى بلا جواب: لماذا؟ لماذا يقفز الإلكترون من مستوى معين للطاقة إلى مستوى آخر، وكيف يعرف الإلكترون أنه ينبغى عليه فعل ذلك؟ هذا سؤال عن السببية، فالسببية لم توضحها نظرية الكم. وفى واقع الأمر مازال السبب والنتيجة قضيتين غائمتين فى دنيا الكوانتم وليس لهما تفسيراً أو معنى. وهذا التساؤل عن بحث بوهر أثاره رزرفورد بمجرد استلامه مخطوط بوهر. أيضًا، فإن هذه الاكتشافات لم تسفر عن صيغة رياضية عامة للفيزياء الكمية، قابلة للتطبيق من ناحية المبدأ للمواقف جميعها وليس فقط لحالات خاصة. كان هذا هو السؤال الأساسى فى ذلك الحين، وحتى وقت متأخر لم يتحقق الهدف، أى ، حتى ميلاد "ميكانيكا الكم الجديدة"، مع أعمال دى برولى، وهايزنبرج، وشرودنجر، وآخرين.

ذاعت شهرة بوهر على نطاق واسع عقب أبحاثه عن الطبيعة الكمية للذرة. والتمس من حكومة الدانمرك أن تمنحه كرسى الفيزياء النظرية، واستجابت له الحكومة. وغدا بوهر الابن المفضل للدانمرك، وأسبغت عليه بلاده كلها مظاهر التكريم. وعلى مدى السنوات القليلة التالية واصل سفرياته إلى مانشستر ليعمل مع رزرفورد، وسافر إلى مناطق أخرى والتقى بالكثير من الفيزيائيين. وأتاحت له هذه الصلات أن ينشئ معهده الخاص.

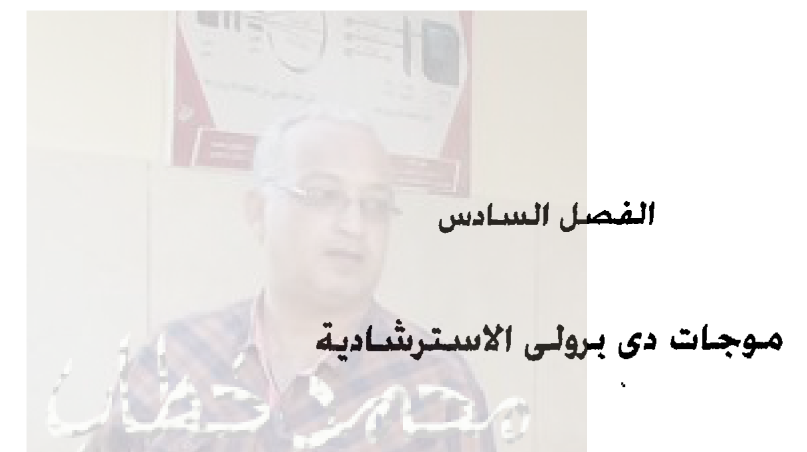
وفى عام ١٩١٨، حصل على تصريح من حكومة الدانمرك بتأسيس معهد للفيزياء النظرية، وتلقى تمويلا من أكاديمية العلوم الملكية بالدانمرك، التى تحصل على دعم من مصنع للبيرة بكارلسبرج. وانتقل بوهر مع أسرته إلى القصر الذى تمتلكه أسرة كارلسبرج على الأراضى والمبانى التابعة لمعهده الجديد. وكان الكثير من الفيزيائيين

الشباب من كل أنحاء العالم يأتون بانتظام ليقضوا عاما أو عامين يعملون فى المعهد ويستمدون الإلهام من فيزيائى الدانمرك العظيم. وغدا بوهر قريبًا من الأسرة الملكية الدانمركية. فضلاً عن الكثير من النبلاء وكذلك النخبة على مستوى العالم. وفى عام ١٩٢٢ نال جائزة نوبل عن أعماله فى نظرية الكم.

وقام بوهر بتنظيم لقاءات علمية منتظمة فى معهده بكوبنهاجن، الذى كان يأتى إليه عدد كبير من كبار الفيزيائيين على مستوى العالم ليطرحوا أفكارهم للنقاش. ولذلك باتت كوبنهاجن مركزًا عالميًا لدراسة ميكانيكيا الكم، خلال الفترة التى تنامت فيها النظرية: منذ تأسيسها فى أواخر العقد الأول للقرن العشرين حتى قبل الحرب العالمية الثانية مباشرة. وكان العلماء العاملون بالمعهد (الذى أطلق عليه اسم معهد نيلز بوهر عقب وفاة مؤسسه) والكثرة الذين جاءوا لحضور اجتماعاته، قد قاموا فيما بعد بتطوير ما يسمى تفسير كوبنهاجن Copenhagen Interpretation لنظرية الكم، الذى دائمًا ما يطلق عليه التفسير الأرثوذوكسي. وقد تم هذا بعد ميلاد "ميكانيكا الكم الحديثة" فى منتصف عشرينيات القرن العشرين. ويحسب تفسير كوبنهاجن لقواعد عالم الكوانتم، ثمة فصل واضح بين ما يلاحظ ومالا يلاحظ. إذ إن نظام الكوانتم هو نظام تحت مجهرى (تحت ميكروسكوبى) ولا يتضمن أجهزة قياس أو عمليات قياس. وفى السنوات التالية، برزت تحديات لتفسير كوبنهاجن من وجهات نظر أكثر حداثة عن العالم تطورت مع نضج نظرية الكم.

وبداية من عشرينيات القرن العشرين، اندلع جدال صاخب داخل جماعة الفيزياء الكمية بلغ ذروته عام ١٩٣٥، وجاء هذا التحدى على يد أينشتين ودام طوال حياته، ودارت مناوشات منتظمة بين بوهر وأينشتين حول معنى نظرية الكم واكتمالها.


محمد خطاب



الفصل السادس

موجات دى برولى الاسترشادية

"بعد تفكير طويل، فى عزلة وتأمل، طرأت لى فجأة خلال عام ١٩٢٣ فكرة أن الاكتشاف الذى توصل إليه أينشتين عام ١٩٠٥ يتعين تعميمه ليشمل كل الجسيمات المادية وبالذات الإلكترونات".

لويس دى برولى

ولد الدوق لويس فيكتور دى برولى فى دييب Dieppe عام ١٨٩٢ لأسرة أرستقراطية فرنسية أمدّت فرنسا لفترة طويلة بالديبلوماسيين، والسياسيين، والقادة العسكريين. وكان لويس هو أصغر أبنائها الخمسة. وتوقعت الأسرة من لويس أن يقتدى بأخيه الأكبر موريس، ويلتحق بالخدمة العسكرية، ولذلك قرر لويس أن يخدم فرنسا. واختار الانضمام إلى الأسطول؛ نظراً لأنه كان يعتقد بأن هذا قد يتيح له دراسة العلوم الطبيعية، التى كانت تخلب لبه منذ طفولته. وانخرط فعليا فى ممارسة العلم التجريبى عندما أنشأ أول جهاز إرسال لاسلكى فى فرنسا على سطح سفينة.

وبعد أن ترك موريس الخدمة العسكرية، وذهب للدراسة فى طولون وكذلك فى جامعة مارسيليا، انتقل إلى قصر فى باريس، حيث اتخذ إحدى حجراته لإنشاء معمل لدراسة الأشعة السينية X-rays. ولمساعدته فى تجاربه، قام موريس واسع الحيلة،

بتدريب خادمه الخصوصى على المبادئ الأولية للخطوات العلمية، وفى النهاية حوّل هذا الخادم إلى مساعد معمل محترف. وكان افتتانه بالعلوم مُعْديا، وعلى الفور غدا أيضًا شقيقه الأصغر لويس مهتما بالبحوث وساعده فى إجراء التجارب.

والتحق لويس بجامعة السوربون، ليدرس تاريخ العصور الوسطى. وفى عام ١٩١١ عمل موريس سكرتيرا لمؤتمر سولفاى الشهير **Solvay Conference** فى بروكسل، حيث كان يجتمع هناك أينشتين مع غيره من كبار الفيزيائيين لمناقشة الاكتشافات المثيرة الجديدة فى الفيزياء. وعقب عودته بعد كل اجتماع، كان موريس يمتع شقيقه الأصغر بحكاياته عن الاكتشافات المبهرة، حتى غدا لويس أكثر افتتانا بالفيزياء.

وبمجرد اندلاع الحرب العالمية الأولى التحق لويس دى برولى مباشرة بصفوف الجيش الفرنسى. وجاءت خدمته فى وحدة لاتصالات الراديو، وهو أمر لم يكن مألوفا فى ذلك الحين. وأثناء خدمته فى وحدة التلغراف بموجات الراديو المقامة على قمة برج إيفل، تعلم الكثير عن موجات الراديو. وأصبح بإمكانه بالفعل أن يضع بصمته على العالم أثناء دراسته للموجات. وما إن انتهت الحرب، حتى عاد دى برولى إلى الجامعة ودرس تحت إشراف عدد من أفضل علماء الفيزياء والرياضيات الفرنسيين، من بينهم بول لانجفين وإميل بوريل. وقام بتصميم تجارب على الموجات واختبرها فى معمل شقيقه بقصر العائلة. أيضًا كان دى برولى عاشقًا لموسيقى الغرفة، وبالتالى حصل على معرفة عميقة بالموجات من وجهة نظر النظرية الموسيقية.

واستغرق دى برولى تماما فى دراسة محاضر اجتماعات مؤتمر سولفاى، التى أعطاها له شقيقه. وخلبت لبه نظرية الكم الوليدة التى نوقشت فى عام ١٩١١، وكان يتم استعراضها مرارًا فى اجتماعات المؤتمر بعد ذلك خلال السنوات التالية.

وقام دى برولى بدراسة الغازات المثالية **Ideal gases**، التى سبق نقاشها فى اجتماع سولفاى، وتوصل بنجاح إلى تطبيق نظرية الموجات فى التحليل الفيزيائى لمثل هذه الغازات، باستخدام نظرية الكم.

وفى عام ١٩٢٣، أثناء اشتغاله برسالة الدكتوراه فى الفيزياء فى باريس، "فجأة" كما كتب فيما بعد: "رأيت أن الأزمة فى علوم الضوء تعود ببساطة إلى العجز عن فهم الازدواجية الشاملة الحقيقية للموجة والجسيم". فى تلك اللحظة، فى واقع الأمر، اكتشف دى برولى هذه الازدواجية. ونشر ثلاث ملاحظات قصيرة حول الموضوع، تفترض أن الجسيمات هى أيضًا موجات، والموجات جسيمات، وهى مسجلة فى محاضر جلسات أكاديمية باريس ومؤرخة فى سبتمبر وأكتوبر ١٩٢٣ ، وقدم دراسة تفصيلية متقنة حول هذا العمل. وتقدم باكتشافه الكامل فى رسالته للدكتوراه، التى نوقشت فى ٢٥ نوفمبر ١٩٢٤ .

وقد استعان دى برولى بمفهوم بوهر عن الذرة ودرسه باعتباره آلة موسيقية يمكنها إصدار نغمة أساسية وسلسلة من النغمات التوافقية. واقترح أن كل الجسيمات لها هذا النوع من الخاصية الموجية. وفيما بعد استعرض جهوده قائلاً: "كنت أرغب فى أن أمثِل لنفسى الاتحاد بين الموجات والجسيمات فى شكل متماسك، إذ إن الجسيم عبارة عن جسم صغير متمركز يندمج فى موجة منتشرة". وأطلق دى برولى على الموجات المصاحبة للجسيمات اسم الموجات الاسترشادية، وبالتالى يكون كل جسيم صغير فى الكون مصحوبا بموجة تنتشر فى الفضاء.

واشتق دى برولى بعض المفاهيم الرياضية الخاصة من أجل موجاته الاسترشادية، ومن أحد هذه الاشتقاقات باستخدام عدد من الصيغ الرياضية، وكذلك ثابت بلانك لنظرية الكم h، توصل دى برولى إلى معادلة تعد هى الإضافة التى قدمها للعلم. إذ تربط معادلته بين كمية حركة الجسيم p، مع الطول الموجى للموجة الاسترشادية المصاحبة له λ، واستخدام ثابت بلانك. وجاءت هذه العلاقة شديدة البساطة على الصورة :

$$p = h/\lambda$$

كانت الفكرة التى توصل إليها دى برولى مبهرة. ها هنا، استخدم آلية نظرية الكم لصياغة علاقة بالغة الوضوح بين الجسيمات والموجات. فالجسيم له كمية حركة

(كلاسيكيا، تنتج من حاصل ضرب سرعته فى كتلته). وثمة ارتباط مباشر بين كمية الحركة هذه والموجة المصاحبة للجسيم. وبالتالى تكون كمية الحركة فى ميكانيكا الكم، طبقًا لصيغة دى برولى الرياضية، مساوية لخارج قسمة ثابت بلانك على الطول الموجى للموجة، عندما ننظر إلى الجسيم باعتباره موجة.

ولم يقدم لنا دى برولى معادلة تصف انتشار الموجة المصاحبة للجسيم. غير أن هذه المهمة كانت فى انتظار عقل كبير آخر، هو إروين شرودنجر Erwin Schrodinger. وعن بحثه الرائد هذا، نال دى برولى جائزة نوبل بعد إجراء الكثير من التجارب التى برهنت على الطبيعة الموجية للجسيمات على مدى السنوات التالية.

وظل دى برولى يمارس عمله بنشاط كفيزيائى، وعاش حياة مديدة، إذ وافته المنية عام ١٩٨٧ عن عمر بلغ ٩٥ عامًا. وعندما كان دى برولى قد أضحى فعليا عالما مشهوراً على مستوى العالم، قام الفيزيائى جورج جامو George Gamow الذى ألف كتاب "ثلاثون عاما هزت الفيزياء" Thirty Years that Shook Physics – بزيارته فى قصره بباريس. ودق جامو الجرس على بوابة المزرعة، وتلقى تحية كبير الخدم الذى يعمل لدى دى برولى، وخاطبه بالفرنسية قائلاً: "إننى أود رؤية البروفيسير دى برولى"، وأكد الخادم فى توقير أنت تقصد السيد الدوق دى برولى ، فقال جامو: "نعم الدوق دى برولى". وسمح له بالدخول أخيراً.

هل الجسيمات أيضًا موجات؟ وهل الموجات جسيمات أيضا؟ أما الإجابة التى تقدمها لنا نظرية الكم فهى "نعم". ثمة خاصية أساسية لنظام الكوانتم، مفادها أن الجسيم هو أيضًا موجة، وتتبدى فيه خصائص التداخل الموجى، وهو ما يحدث فى تجربة الحائل ذى الفتحتين. وبالطريقة نفسها، يمكن للموجات أن تكون جسيمات، كما علّمنا أينشتين حينما طور بحثه عن التأثير الكهروضوئى، الذى نال عنه جائزة نوبل، وسوف نقدم له عرضا فيما بعد. وثبت بالتالى أن موجات الضوء هى أيضًا جسيمات تسمى الفوتونات.

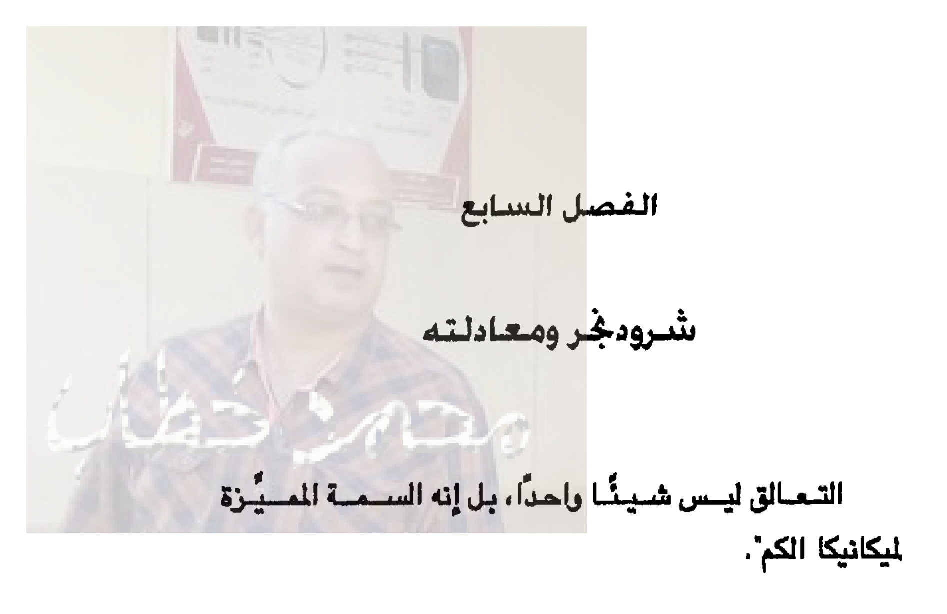
وبالنسبة إلى أشعة الليزر فإنها تتكون من ضوء متماسك، حيث تكون كل موجات الضوء فى هذه الأشعة متحدة فى الطور، ومن هنا تكمن قوة أشعة الليزر. وفى عام ٢٠٠١، اقتسم جائزة نوبل فى الفيزياء ثلاثة علماء اكتشفوا أن الذرات، أيضاً، يمكنها أن تسلك مثل أشعة الضوء؛ بمعنى أن أى أداء موحد لمجموعة منها يمكن أن يجعلها فى حالة ملتحمة، شأنها شأن أشعة الليزر. وقد أثبت هذا الاكتشاف الحدس الذى صدر عن أينشتين وزميله، فى عشرينيات القرن الماضى، الفيزيائى الهندى سيرندرا ناث بوز Saryendra Nath Bose. وكان بوز Bose أستاذاً للفيزياء بجامعة دكا لا يعرفه أحد. وفى عام ١٩٢٤ بعث رسالة إلى أينشتين عرض فيها أن كوانتم الضوء لأينشتين، المسمى الفوتونات، يمكنها أن تشكل نوعًا من "الغاز" مشابها لذلك الذى يتكون من الذرات أو الجزيئات، وأعاد أينشتين كتابة ورقة بوز، وأدخل عليها بعض التحسينات، وأرسلها كى تنشر باسمهما معا. وهذا الغاز الذى افترضه بوز وأينشتين كان شكلاً جديدا من أشكال المادة، حيث تنعدم به أى خصائص للجسيمات المنفردة، ولا يمكن تمييزها. وأدى هذا الشكل الجديد للمادة المسمى بوز – أينشتين إلى تقديم أينشتين لـ "فرض حول حدوث تفاعل بين الجزيئات ذى طبيعة غامضة تماما حتى الآن".

وقد أتاحت إحصائيات شكل المادة بوز – أينشتين، أن يتقدم أينشتين بتنبؤات فذة حول سلوك المادة فى درجات الحرارة بالغة الانخفاض، إذ تتلاشى لزوجة الغازات المسالة عند هذه الدرجات المنخفضة، وهو ما ينجم عنه التميع الفائق Super Fluidity، وسميت هذا العملية تكثيف بوز – أينشتين.

وفى عام ١٩٢٤، بعث لويس دى برولى رسالته للدكتوراه إلى بول لانجفين ليفحصها، وهو صديق أينشتين بباريس. وتأثر لانجفين بشدة من فكرة دى برولى بإمكانية أن يكون للمادة خاصية موجية، حتى إنه بعث الرسالة إلى أينشتين يستطلع رأيه. وحين قرأ أينشتين بحث دى برولى علق قائلاً: "رائع جداً"، وفيما بعد استخدم فكرة دى برولى عن الموجة لاستنتاج الخصائص الموجية للمادة الجديدة التى اكتشفها مع بوز. إلا أن أحدا لم ير أيا من متكثفات بوز – أينشتين حتى عام ١٩٩٥ .

فى ٥ يونيو عام ١٩٩٥، استخدم كل من كارل فيمان Carl Weiman من جامعة كولورادو، وإريك كورنل Eric Kornell من المعهد القومى للمعايير والتكنولوجيا، أشعة ليزر فائقة الشدة مع تقنية جديدة لتبريد المادة إلى درجة حرارة تقترب من الصفر المطلق، وذلك لخفض حرارة نحو ٢٠٠٠ ذرة روبيديوم. واكتشفا أن هذه الذرات تمتلك خواص أحد متكثفات بوز- أينشتين، وظهرت على شكل سحابة داكنة بالغة الصغر، حتى إن الذرات المكوِّنة لها فقدت خواصها الفردية واندمجت فى مستوى طاقة واحد. وفى كل الأحوال، أصبحت هذه الذرات كينونة كمية (كوانتم) واحدة، تتفق مع الخصائص الموجية التى حددها دى برولى.

وبعد ذلك بفترة وجيزة، عاد وولفجانج كيتيرل Wolfgang Ketterle من M.I.T (معهد ماساتشوستس للتكنولوجيا) للتوصل إلى النتائج نفسها، وأدخل تحسينا على التجربة، لتسفر عن إنتاج شكل يكافئ شعاع ليزر غير أنه يتكون من الذرات. وعن هذه البحوث نال العلماء الثلاثة جائزة نوبل مشاركة فى فرع الفيزياء، وأعيد تأكيد فكرة دى برولى المبهرة فى سياق جديد، اتسعت من خلاله حدود ميكانيكا الكم إلى مستوى الأجسام التى يمكن رؤيتها بالعين المجردة (الأجسام الماكروسكوبية).



الفصل السابع

شرودنجر ومعادلته

"التعالق ليس شيئًا واحدًا، بل إنه السمة المميِّزة لميكانيكا الكم".

إيروين شرودنجر

ولد إيروين شرودنجر فى منزل بوسط فيينا عام ١٨٨٧ لأبوين ثريين. ولأنه الطفل الوحيد، فقد كان موضع شغف عدد من الخالات (العمات)، إحداهن علمته النطق والقراءة بالإنجليزية، حتى قبل أن يتبين أصوله الألمانية ويتعلم لغتها. وتمرس، وهو بعد طفل صغير على تسجيل يومياته، وهى عادة لازمته طيلة حياته. ومنذ سن مبكرة، بدت عليه نوازع الشك فى إطار صحى، والميل إلى طرح تساؤلات فيما اعتاد الناس أن يعتبروه حقائق. وكانت هاتان العادتان بالغتى الفائدة فى حياة عالِم، سوف يقدم واحدا من أعظم الإسهامات أهمية لنظرية الكم الجديدة. إذ إن طرح الأسئلة حول ما نتعامل معه فى حياتنا اليومية كحقائق أمر أساسى فى مقاربة عالم الجسيمات الدقيقة. وربما سنجد أن الدفاتر التى كان شرودنجر يدون فيها ملاحظاته ستكون حاسمة فى تطويره للمعادلة الموجية.

ما أن بلغ إيروين الحادية عشرة من عمره، التحق بالمدرسة الثانوية التى تقع على مسافة عدة دقائق سيرًا على الأقدام من منزله. علاوة على مادتى الرياضيات والعلوم،

كانت المدرسة تزود تلاميذها باللغة اليونانية والثقافة اليونانية واللاتينية ودراسة الأعمال الكلاسيكية، بما فيها أعمال أوفيد Ovid، وليفى Livy، وشيشرون Cicero، وهوميروس[٤] Homer. وأحب إيرفن الرياضيات والفيزياء، ونال فيها أعلى الدرجات، وكان يحل المسائل بسهولة ويسر بالغين على نحو كان يذهل زملاءه. أيضًا كان يستمتع بالشعر الألمانى والمنطق الذى ينطوى عليه النحو، سواء القديم أو الحديث. وهذا المنطق، فى الرياضيات وفى الدراسات الإنسانية، هو ما شكل تفكيره وأعده لمواجهة صرامة التحديات بالجامعة.

وأحب إيروين النزهات الخلوية وتسلُّق الجبال، وارتياد المسارح، ومرافقة الفتيات الجميلات وهى أنواع من التسلية تميز بها سلوكه طوال حياته. وفى فترة الطفولة، كان جادا فى دراسته وفى لهوه على حد سواء. وقضى أيامًا عديدة، يتجول بين الجبال، ويدرس الرياضيات، ويغازل شقيقة أقرب أصدقائه إليه، وهى فتاة جميلة داكنة الشعر تسمى لوتى ريلا[٥] Lotte Rella.

وفى عام ١٩٠٦، التحق شرودنجر بجامعة فيينا – وهى إحدى أقدم الجامعات فى أوروبا، تأسست عام ١٣٦٥– لدراسة الفيزياء، وكان للجامعة تراث عريق فى الفيزياء. ومن بين ذوى العقول الكبيرة الذين التحقوا بهذه الجامعة أو تخرجوا منها فى فترة انضمام شرودنجر إليها – لودفيج بولتزمان أحد أصحاب الاقتراحات فى النظرية الذرية، وإيرنست ماخ Ernst Mach العالم النظرى الذى ألهمت أعماله أينشتين. وهناك تتلمذ شرودنجر على يد فرانز إكسنر Franz Exner، ومارس أبحاثا فى الفيزياء التجريبية، بعضها ذو صلة بالنشاط الإشعاعى. وكانت جامعة فيينا من المراكز المهمة لدراسة النشاط الإشعاعى. وقد تلقت مارى كورى Marie Curie بعض عينات المادة المشعة التى أجرت بها اكتشافاتها من قسم الفيزياء بهذه الجامعة.

وحاز شرودنجر إعجاب زملائه الطلاب لتميزه فى الفيزياء والرياضيات، ودائمًا ما كان أصدقاؤه يسعون إليه لمعاونتهم فى فهم الرياضيات. ومن بين فروع الرياضيات التى درسها بجامعة فيينا كانت "المعادلات التفاضلية"، التى أجادها بامتياز.

ومن تصاريف القدر، أن هذه المهارة الخاصة، برهنت على أنها لا تقدر بثمن فى حياته العلمية: فقد ساعدته فى حل أعظم مسألة فى حياته وسجلت اسمه كأحد رواد ميكانيكا الكم.

غير أن شرودنجر عاش حياة متعددة الجوانب وهو طالب بجامعة فيينا فى قمة مجدها الإمبراطورى، فقد احتفظ بإمكانياته كبطل رياضى، وكان منغمسا فى الحياة الاجتماعية شأن أى وقت مضى فى حياته: إذ وجد عدداً من الأصدقاء الجيدين يمضى معهم أوقات الفراغ فى تسلق الجبال والتجوال بينها. وذات مرة، فى جبال الألب، قضى ليلة كاملة فى تمريض صديق له كسرت ساقه أثناء التسلق، وبمجرد نقل صديقه إلى المستشفى، أمضى يومه فى التزحلق على الجليد.

وفى عام ١٩١٠، كتب شرودنجر رسالته للدكتوراه فى الفيزياء، تحت عنوان "حول توصيل الكهرباء على سطح العوازل فى الهواء الرطب". وكانت هذه مسألة تنطوى على بعض المضامين فى دراسة النشاط الإشعاعى، إلا أن البحث لم يكن على مستوى يليق بباحث؛ فقد أهمل شرودنجر عدداً من العوامل التى كان يجب أن يضعها فى اعتباره، ولم يكن تحليله وافيًا أو بارعًا. ومع ذلك كان بحثه كافيا لمنحه الدكتوراه، وعقب تخرجه أمضى عامًا بالجبال كمتطوع فى موقع للمدفعية. وعاد بعدها إلى الجامعة ليعمل كمساعد فى معمل للفيزياء، وفى الوقت نفسه عمل فى الورقة البحثية المطلوبة (المسماة A habilitation schrift)، ليتاح له الحصول على دخل من عمله كمدرس خصوصى بالجامعة. وكانت ورقته (حول النظرية الحركية – الكينيتيكية – للمغناطيسية) محاولة نظرية لتفسير الخواص المغناطيسية للمركبات المختلفة، وأيضًا لم تكن ذات نوعية استثنائية، لكنها كانت تفى بالمتطلبات، وأتاحت له العمل بالجامعة. وهكذا بدأ خطواته الأولى فى حياته الأكاديمية.

وبعد فترة قصيرة، وكان حينئذ فى أوائل العشرينات، التقى بفتاة أخرى دون العشرين خلبت لبه. كان اسمها فيليشيا كراوس Felicie Krauss، وتنتمى أسرتها إلى طبقة النبلاء الأدنين فى النمسا. وطور الاثنان علاقتهما واعتبرا نفسيهما متزوجين

رغم الاعتراضات القوية من والدى الفتاة، وأصرت أمها – على وجه الخصوص – ألا تسمح لابنتها بالزواج من شخص من الطبقة العاملة، وهو، حسب اعتقادها، لن يتمكن من توفير حياة بمستوى يليق بابنتها اعتماداً على دخله من الجامعة. وفى لحظة يأس، عزم إيروين على ترك الجامعة والعمل لدى أبيه، الذى كان يمتلك مصنعا، لكن الأب لم يكن ليقبل أى شىء من ذلك، ومع ازدياد ضغوط الأم، أعلن العاشقان إلغاء خطبتهما غير الرسمية. ورغم زواج فيليشيا بعد ذلك، فقد ظلت دائما قريبة من إيروين. وكان ذلك، أيضًا، نموذجا استمر طوال حياة شرودنجر، أينما يذهب – حتى بعد زواجه – دائماً تكون هناك عشيقات صغيرات السن لسن بعيدات جداً عنه.

واصل شرودنجر دراسته للنشاط الإشعاعى فى معمل جامعة فيينا . وفى عام ١٩١٢، حلّق زميله فيكتور هيس فى بالون على ارتفاع ١٦ ألف قدم مصحوباً بأجهزة لقياس الإشعاع. وأراد من ذلك معرفة السبب فى قياس الإشعاع فحسب قريبا من سطح الأرض، حيث توجد رواسب للراديوم واليورانيوم كمصدر لهذا الإشعاع، بل يتم اكتشافه في الهواء أيضا . واكتشف هيس، وهو بالبالون المرتفع، أمرا بمثابة المفاجأة له وهو أن الإشعاع يبلغ فعليا ثلاثة أمثال قيمته عند مستوى سطح الأرض. وهكذا جاء اكتشاف هيس للأشعة الكونية، وهو الاكتشاف الذى نال عنه جائزة نوبل. أما شرودنجر، الذى شارك فى تجارب ذات صلة على خلفية الإشعاع عند مستوى سطح الأرض، فقد سافر في أرجاء النمسا ومعه أجهزة رصد الإشعاع. وأتاحت له هذه الرحلة فرصة التمتع بالمناطق الخلوية المحببة إلى نفسه ، واتخاذ أصدقاء جدد. وفى عام ١٩١٣، كان قد أخذ أجهزة قياس الإشعاع إلى الهواء الطلق بالمنطقة التى تقضى بها إحدى العائلات إجازتها وكان قد سبق له التعرف عليهم فى فيينا، وكانت مع الأسرة فتاة جميلة فى طور المراهقة تسمى انيمارى بارتل (آنى) وافتتن الباحث ذو الأعوام الستة والعشرين والفتاة ذات الستة عشر ربيعا ببعضهما البعض، وخلال أعوام تالية التقيا مراراً، وطورا علاقة رومانسية أسفرت عن زواجهما . ولبثت آنى على وفائها لشرودنجر طيلة حياته، حتى إنها كانت تغفر له علاقاته المتكررة مع غيرها من النساء.

وفى عام ١٩١٤، عاد شرودنجر وانضم إلى مدفعية القلاع ليحارب ضمن الجبهة الإيطالية فى الحرب العالمية الأولى. حتى وهو فى ميدان القتال، واصل اشتغاله بمسائل الفيزياء، وكتب بحوثا فى المجلات المتخصصة، ولم تكن بحوثه تلك جيدة المستوى بصورة استثنائية، لكن الموضوعات كانت مثيرة للاهتمام. وأنفق شرودنجر وقتا طويلاً فى بحوثه حول نظرية الألوان، وقدم إسهامات أفادت فى فهمنا للضوء المتكون من أطوال موجية مختلفة، وخلال إحدى تجاربه على اللون بينما كان فى جامعة فيينا، اكتشف أن لديه عيبا فى رؤية الألوان.

وفى عام ١٩١٧، كتب شرودنجر ورقته البحثية الأولى فى نظرية الكم، حول الحرارة الذرية والجزيئية، وكان البحث المتضمن فى هذه الورقة قد شد اهتمامه إلى أعمال بوهر وبلانك وأينشتين. وبمرور الوقت وضعت الحرب أوزارها، ولم يقتصر تناول شرودنجر فحسب على نظرية الكم، بل امتد ليشمل نظرية أينشتين عن النسبية. وفى ذلك الحين كان قد وضع نفسه على حافة الريادة فى الفيزياء النظرية.

وفى السنوات التى أعقبت الحرب، زاول شرودنجر التدريس فى جامعات فيينا، وبينا، وبرسلاو، وشتوتجارت، وزيوريخ. وتزوج فى فيينا عام ١٩٢٠ من آني برتل، وكان دخلها أعلى من مرتبه الجامعي، الأمر الذى جعله مضطرباً وحفزه للبحث عن عمل فى الجامعات الأخرى بأنحاء أوروبا. وعن طريق آني، التقى إيروين مع هانسى بوير، التى أصبحت فيما بعد إحدى رفيقاته وظلت علاقته بها طيلة حياته.

وشرع شرودنجر فى شتوتجارت عام ١٩٢١، يبذل جهداً كبيراً فى فهم نظرية الكم وإجراء تطويرات عليها. وكان بوهر وأينشتين اللذان لم يكونا أكبر سناً بكثير من شرودنجر، قد قدما إسهاماتهما لهذه النظرية، وهما ما زالا فى العشرينات. كان العمر يمضى بشرودنجر ولَّما يحقق بعد إنجازاً علمياً كبيرا. وركز جهوده على إيجاد نموذج لخطوط طيف الفلزات القلوية.

وفى أواخر عام ١٩٢١، تم تعيين شرودنجر فى المنصب الذى كان يشتهيه، وهو أستاذ كامل للفيزياء النظرية بجامعة زيوريخ. وفى تلك السنة، أصدر أول بحث مهم له

فى مجال الكم، حول المدارات الكمية لإلكترون منفرد، اعتمادا على عمل بوهر المبكر. ويمجرد وصوله إلى زيوريخ،، أصيب بمرض فى الرئة وأمره الأطباء بالتزام الراحة فى مكان مرتفع. وقررت أسرته الإقامة فى قرية تسمى Arosa بجبال الألب، لا تبعد كثيراً عن دافوس، على ارتفاع ٦٠٠٠ قدم عن سطح البحر. وبعد شفائه، عادوا إلى زيوريخ، وهناك، فى عام ١٩٢٢، ألقى شرودنجر محاضرته الافتتاحية بالجامعة. وفى عامى ١٩٢٣، و١٩٢٤، تركزت أبحاث شرودنجر على نظرية الطيف، والضوء، والنظرية الذرية والطبيعة الدورية للعناصر. وفى عام ١٩٢٤ وقد بلغ ٣٧ عاماً، تم دعوته لحضور مؤتمر سولفاى فى بروكسل، حيث تلتقى أعظم العقول فى الفيزياء، بما فيهم أينشتين وبوهر. لكن وجود شرودنجر هناك كان غالبا بصفة مراقب من الخارج، نظراً لأنه لم يكن قد أصدر بحوثا بالغة الأهمية.

ولم تكن نظرية الكم بأية حال قد اكتملت أركانها بعد، وكان إيرفن شرودنجر يسعى بكل طاقته ليجد موضوعا فى مجال الكم يستطيع من خلاله أن يصنع علامة بارزة. وكان الوقت يمر عليه سريعا، وإذا لم يحدث شىء على الفور، سيتهم بالخمول، وبأنه متوسط القيمة، ويبقى دائماً أسير الصفوف الجانبية، بينما الآخرون يصنعون التاريخ العلمى. وفى عام ١٩٢٤، طلب بيتر ديبى Peter Debye من جامعة زيوريخ من شرودنجر تقديم تقرير عن نظرية دى برولى خاص بالنظرية الموجية للجسيمات فى حلقة بحث تعقد بالجامعة. وقرأ شرودنجر البحث وشرع يتأمل فى الأفكار التى تضمنها، وقرر أن يواصل بحثها لمدى أبعد، وبدأ يعمل فى فكرة الجسيم – الموجة لـ دى برولى عاما كاملا، لكنه لم يحقق أى اختراق.

وقبل الكريسماس بعدة أيام، وفى عام ١٩٢٧، ارتحل إيروين إلى جبال الألب، ليقيم فى فيلا هيرفج فى Arosa، حيث كان قد أمضى مع آنى عدة شهور خلال فترة استشفائه منذ أربع سنوات. وفى هذه المرة ذهب بدون زوجته. ومن مراسلاته، نعلم أنه كانت معه-إحدى رفيقاته السابقات من فيينا التى لحقت به هناك، ومكثت بالفيلا معه حتى أوائل عام ١٩٢٦ . وقد أثار كاتب سيرته الذاتية وولتر مور Walter Moor الكثير

من اللغط حول من هى رفيقته تلك[٦]. هل كانت لوتى، أو فيليشيا، أو هانسى، أو علاقة غرامية أخرى؟ على أية حال، حسبما يقول الفيزيائى هيرمن فايل Hermann Weyl، فقد تصادف الغرام المشبوب لشرودنجر لتلك السيدة المجهولة مع تفجر الطاقة التى احتاج إليها ليصنع اختراقه العظيم لنظرية الكم. وخلال عطلة الكريسماس فى جبال الألب مع محبوبته السرية، استطاع أن يأتى بمعادلته الشهيرة والمسماة باسمه: معادلة شرودنجر. وهذه المعادلة هى القاعدة الرياضية التى تصف السلوك الإحصائى للجسيمات فى العالم دقيق الحجم لميكانيكيا الكم. وهذه المعادلة تتخذ إحدى صور المعادلات التفاضلية.

والمعروف أن المعادلات التفاضلية نوع من المعادلات الرياضية تحدد العلاقة بين أى كمية ومشتقاتها، بمعنى: العلاقة بين هذه الكمية ومعدل تغيرها، على سبيل المثال، فإن السرعة هى مشتقة (أو معدل تغير) الموضع، فإذا تحرك شخص بمعدل ٦٠ ميلا فى الساعة، فإن هذا يعنى أن موقعه على الطريق يتغير بمعدل ٦٠ ميلا كل ساعة. كما أن العجلة هى معدل تغير السرعة (فمن يتحرك بعجلة، يكون معنى ذلك أن السرعة تزداد)، ولذلك فإن العجلة هى المشتقة الثانية للموضع. وكل معادلة تصف الموضع، كمتغير، إضافة إلى السرعة، هى معادلة تفاضلية، كما أن كل معادلة تربط بين الموضع والسرعة، وكذلك العجلة هى معادلة تفاضلية من الدرجة الثانية.

فى الوقت الذى بدأ فيه شرودنجر يتناول مسألة اشتقاق المعادلة التى تحكم السلوك الكمى لجسيم دقيق مثل الإلكترون، كان عدد من المعادلات التفاضلية للفيزياء الكلاسيكية معروفا. مثلا، كانت المعادلة التى تحكم تزايد الحرارة فى أى فلز معروفة، فضلاً عن المعادلات التى تحكم الموجات الكلاسيكية، مثل الموجات الصادرة عن وتر مهتز، والموجات الصوتية، جميعها كانت فعليا معروفة. وبعد دراسته لمقررات دراسية فى المعادلات التفاضلية غدا شرودنجر على وعى تام بهذه التطورات. وباتت مهمته تنحصر فى إيجاد معادلة تستطيع وصف تنامى الموجات الجسيمية، وهى الموجات التى قال دى برولى إنها تصاحب الجسيمات الدقيقة. وأجرى شرودنجر عدة تخمينات بارعة حول الشكل الذى يتعين أن تأخذه معادلته، اعتماداً على المعادلة الموجية

الكلاسيكية المعروفة. وكان مما يجب عليه أن يقرره، مع هذا، ما إذا كان سيستخدم المشتقة الأولى أو الثانية للمعادلة الموجية بالنسبة إلى الموضع، وما إذا كان سيستخدم المشتقة الأولى أو الثانية بالنسبة إلى الزمن. وحدث اختراقه حينما اكتشف أن المعادلة المناسبة هى من الدرجة الأولى بالنسبة إلى الزمن ومن الدرجة الثانية بالنسبة إلى الموضع.

$$H\Psi = E\Psi$$

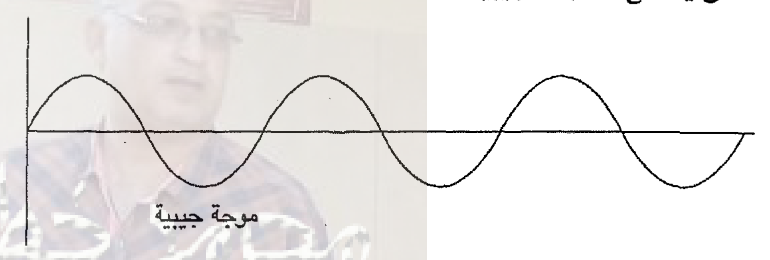
والمعادلة المذكورة أعلاه هى معادلة شرودنجر المستقلة عن الزمن، وهى موضوعة فى أبسط صيغها الرمزية. حيث الرمز Ψ يمثل الدالة الموجية لجسيم وهى موجة دى برولى الاسترشادية لأى جسيم. لكن هنا لم تعد ثمة كينونات افتراضية، بل دالة نستطيع دراستها وتحليلها فعليا باستخدام معادلة شرودنجر. والرمز H هنا يشير إلى معامل(*) Operator، وهو يمثل معادلة خاصة به، يمكنها التعامل مع الدالة الموجية بإجراء اشتقاق وكذلك ضرب المعادلة الموجية فى بعض الأعداد، بما فيها ثابت بلانك h. والمعامل H يؤثر على المعادلة الموجية، والنتيجة فى الطرف الآخر للمعادلة، هو أحد مستويات الطاقة E، مضروبا فى الدالة الموجية.

وحققت معادلة شرودنجر نجاحا كبيراً عند تطبيقها على عدد من الحالات في فيزياء الكم. وكان على أى فيزيائى أن يكتب المعادلة أعلاه، لتطبيقها على حالة معينة، لنقل، على جسيم موضوع فى صندوق ميكروسكوبى، أو إلكترون ضمن مجال للجهد، أو على ذرة الهيدروجين. وفى كل حالة، يتعين على الفيزيائى استخدام ومعالجة معادلة شرودنجر للحصول على الحل. وتأتى حلول معادلة شرودنجر على شكل موجات.

وعادة يتم تمثيل الموجات فى الفيزياء فى صورة دوال مثلثية: فى الأغلب الأعم على صورة دالة الجيب أو دالة جيب التمام، وفى التمثيل البيانى لها تظهر على الصورة

(*) المعامل – المؤثر: operator رمز يدل على إجراء عملية رياضية معينة مثل عملية التفاضل أو الاشتقاق (المراجع).

الموجية. (ويستخدم الفيزيائيون أيضًا دوالاً أخرى، مثل دوال القوى الأسية).
والشكل التالى يوضح الموجة الجيبية.



موجة جيبية

ويحل معادلة شرودنجر، يحصل الفيزيائى على حل للدالة الموجية فى صورة على النحو التالى: $\Psi = A \sin (n\pi x/L)$ ، وهذا الحل لجسيم موضوع فى صندوق جاسئ Rigid. (والتعبير Sin يمثل دالة الجيب المناظر للحركة الموجية، بينما كل الرموز المستخدمة فى المعادلة تدل على قيم ثابتة، أو متغير واحد مثل x لكن العنصر الأساسى هنا هو دالة الجيب).

ومع هذه المعادلة الموجية، استطاع شرودنجر أن يرتفع بميكانيكا الكم إلى مستوى بالغ السمو. فقد أمكن للعلماء فى ذلك الحين التعامل مع دالة موجية محددة الملامح، حيث يمكنهم أحيانا كتابتها بمصطلحات معينة، كما فى المثال السابق، لوصف الجسيمات أو الفوتونات. وقد أفضى هذا بنظرية الكم إلى حد أمكن من خلاله جلاء الكثير من أهم أوجهها . ومن بين هذه الأفكار كان نظرية الاحتمال، والتراكب.

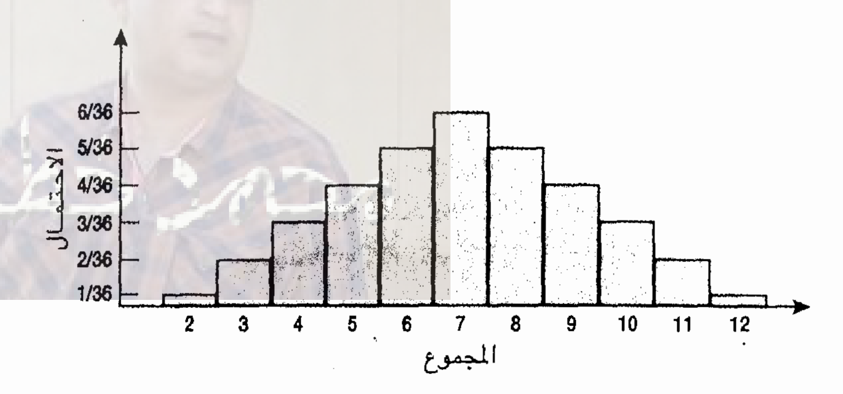
حين نتعامل مع النظم الكمية – التى تصاحب أيا منها دالة موجية Ψ- فإننا على الفور نتعامل مع عناصر معلومة بدقة. فأى جسيم كمى يمكن وصفه فحسب من خلال احتمالاته – ولا يمكن قط من خلال مصطلحات مضبوطة. وهذه الاحتمالات تتحدد تماما من خلال الدالة الموجبة Ψ. وكان التفسير الاحتمالى لميكانيكا الكم قد اقترحه ماكس بورن Max Born، رغم أن أينشتين كان على علم به قبل ذلك. ويمكن حساب احتمالية وجود جسيم فى مكان معين بأنه يساوى مربع سعة Amplitude الدالة الموجية فى ذلك الموضع:

$$\text{الاحتمال} = |\Psi|^2$$

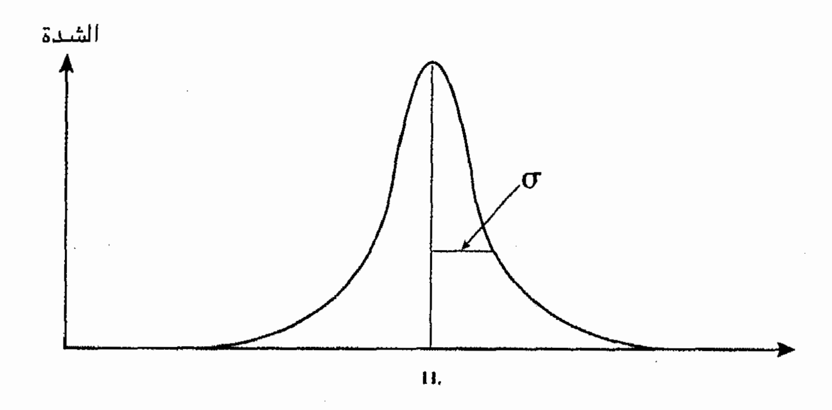
وهذه صيغة تحظى بأهمية لا حد لها فى نظرية الكم. وبأشكال مختلفة، فهى تمثل جوهر (لب) ما يمكن أن تقدمه لنا نظرية الكم. ففى الفيزياء الكلاسيكية، نستطيع – من حيث المبدأ– قياس، وتحديد، والتنبؤ بموضع وسرعة جسم متحرك بنسبة ١٠٠٪ على وجه اليقين. وهذا الملمح للفيزياء الكلاسيكية (للأجسام المرئية) هو الذى يتيح لنا على سبيل المثال، إجراء إنزال لسفينة فضاء على سطح القمر، ناهيك عن قيادة سيارة، أو الرد على من بالباب. أما فى دنيا الجسيمات الدقيقة، فليس لدينا قدرات التنبؤ بحركات هذه الأجسام المعينة. أما تنبؤاتنا فتكون إحصائية فحسب فى طبيعتها. ويمكننا أن نحدد أين سيوجد الجسيم (إذا كان الموضع الملاحَظ يتحدد من الناحية الواقعية) وذلك باستخدام احتمالات لنواتج مختلفة (أو يساوى قدرا كبيرا من الجسيمات التى تكون فى موضع معين)، وتتيح لنا معادلة شرودنجر إجراء هذه التنبؤات الاحتمالية. وكما أمكن البرهنة رياضيًا على مدى عدة عقود، فإن الاحتمالات هى كل ما يمكننا الحصول عليه من ميكانيكا الكم. ولا توجد هنا كميات غير معلومة إذا عرفناها يمكن تقليل عدم التأكد (التحدد). إذ إن نظرية الكم، فى جوهرها، عملية إحصائية.

على أن الاحتمالات تنجم عن أى توزيع احتمالى، وهى فى حالة نظرية الكم تتعين من خلال مربع سعة الدالة الموجية. كما أن نتائج تنبؤات أحداث كمية تختلف عن التنبؤ بحركة سيارة. مثلا، لو أننا علمنا سرعة السيارة وموضعها الابتدائى، فسنتمكن من معرفة موضعها بعد فترة زمنية معينة إذا سارت بسرعة معينة، حيث يمكن قياس الزمن والسرعة بدقة كبيرة. فإذا سارت لمدة ساعتين بسرعة ٦٠ ميلا فى الساعة، فإنها ستقطع ١٢٠ ميلا من نقطة البداية، أما فى عالم الكم فالأمر لا يكون على ذلك النحو. فأفضل ما يمكن عمله هو التنبؤ بالنتائج فى ضوء الاحتمالات. ويكون الموقف، لذلك، مشابها لإلقاء زوج من النرد، فكل واحد منهما لديه احتمال أن يتوقف عند ١/٦من الأرقام التى يحملها، وإذا كان النردان مستقلين، فإن إلقاء الزوج معا لينتج الرقم ٦ على الأول يكون احتماله ١/٦، وكذلك ٦ للثانى يكون احتماله ١/٦ أيضًا، واحتمال أن

ينتج الرقم ٦ للاثنين معـا = ١/٣٦ ؛ أى احـتـمـال أن يكون مجموع الرقمـين ١٢ للنردين = ١/٣٦ . أما أقصى احتمال للنردين معا حينما يكون مجموع الرقمين = ٧ ، وهذه الاحتمالية تساوى ١/٦ . والشكل التالى يوضح توزيع مجموع رقمى نردين:



على أن مربع سـعـة دالة مـوجيـة Ψ، تتـخـذ فى توزيعـهـا غـالبا شكل الجـرس. والشكل التالى يوضح هذا التوزيع.



والتوزيع السابق يبين لنا أن احتمال وجود الجسيم، فى أى مدى معطى من القيم للمحور الأفقى تعادل المساحة المحصورة أسفل المنحنى أعلى تلك المنطقة.

كما أن العنصر الأساسي الثاني لنظرية الكم الذي سلطت معادلة شرودنجر الضوء عليه هو مبدأ التراكب Superposition. إذ يمكن للموجات دائمًا أن تتراكب واحدة فوق الأخرى. ويرجع السبب في ذلك إلى أن منحنى الجيب ومنحى جيب التمام عند مؤشرات (parameters) مختلفة يمكن إضافتها بعضها لبعض. وهذا هو مبدأ تحليل فورير Fourier analysis، الذي اكتشفه الرياضي الفرنسي الكبير جوزيف فورير (١٧٦٨ - ١٨٣٠)، وضمَّنه كتابه (النظرية التحليلية للحرارة) في عام ١٨٢٢ . وطبَّق فورير نظريته على انتشار الحرارة، كما هو واضح من عنوان كتابه. وأثبت أن كثيرا من الدوال الرياضية يمكن وضعها في صورة حاصل جمع دوال جيب أو دوال جيب تمام.

وفي ميكانيكا الكم، نظراً لأن حلول معادلة شرودنجر تؤدي إلى موجات، فإن حاصل جمع هذه الموجات تمثل أيضًا حلولا للمعادلة. (حاصل جمع عدة حلول لمعادلة شرودنجر هو أحد الحلول بسبب الخاصية الخطية). ويفضي هذا، على سبيل المثال، إلى أن الإلكترون يمكن وجوده أيضًا في حالة هي تراكب لحالات أخرى. وينجم هذا لأن حل معادلة شرودنجر بالنسبة إلى الإلكترون يتخذ صورة موجة جيبية؛ وبالتالي يكون ناتج جمع هذه الموجات الجيبية هي حل أيضا .

ويفسر تراكب الموجات ظاهرة التداخل. ففي تجربة يانج للشق المزدوج، تتداخل الموجات مع بعضها البعض، بمعنى، تكون الخطوط المضيئة على الحائل هي مناطق إضافة الموجات التي تقوِّي بعضها بعضا ، أما الخطوط الداكنة فتكون لمناطق طرح الموجات، مما يجعل الضوء ضعيفا أو منعدما تماماً .

ويؤلف التراكب واحدا من أهم مبادئ ميكانيكا الكم. ففي واقع الأمر سنجد أن أوجه الغرابة في ميكانيا الكم تتجلى حينما يتراكب جسيم مع نفسه. وفي تجربة يانج، حتى إذا كان الضوء بالغ الضعف، أي لا ينبعث إلا فوتون واحد في كل مرة، إلا أننا نظل نجد نموذج التداخل على الحائل. (ينتج النموذج من خلال عدد من الفوتونات، وليس فوتونا واحدا ، حتى وإن كان لا يصل إلا فوتون واحد كل فترة زمنية).

ويمكن تفسير هذه الظاهرة بأن الفوتون الوحيد لا يختار فتحة واحدة، أو الأخرى للمرور خلالها، لكنه يختار الفتحتين، وبالتالى يتداخل الفوتون مع نفسه. كما تتداخل موجتان عن طريق التراكب.

وعندما يحتوى النظام الكمى على أكثر من جسيم واحد، يتسبب مبدأ التراكب فى ظاهرة التعالق. والأمر الآن ليس مجرد جسيم يتداخل مع نفسه – إنه نظام يتداخل مع نفسه: نظام متعالق. والمذهل حقا، أن إيروين شرودنجر كان على يقين من أن الجسيمات أو الفوتونات الناتجة عن عملية تربطهم معا سوف تتعالق، وأنه بالفعل صاغ مصطلح التعالق entanglement، سواء فى لغته الأصلية الألمانية أو الإنجليزية. وقد اكتشف شرودنجر احتمال التعالق عام ١٩٢٦، عندما أجرى بحثه الرائد عن ميكانيكا الكم الجديدة، لكن المرة الأولى التى استخدم فيها تعبير التعالق كان فى عام ١٩٣٥، فى مناقشته لبحث أينشتين وبودولسكى وروسين.

واستنادا إلى ما ذكره هورن، وشيمونى وزايلنجر، فإن شرودنجر أقر فى عدد من الأوراق عام ١٩٢٦ أن الحالة الكمية لنظام يتكون من عدد (n) من الجسيمات يمكنه أن يتعالق(٧). وكتب شرودنجر:

"لقد لفتنا الانتباه مراراً إلى حقيقة أن الدالة Ψ لا يمكن ومن غير المحتمل تفسيرها مباشرة بالنسبة إلى الفراغ ثلاثى الأبعاد، مع أن المشكلة هنا غالبا تكمن فى أن الإلكترون المفرد ينزع إلى تضليلنا فى هذه النقطة؛ وذلك بسبب أنها عموما دالة فى الفضاء النسبى، وليس الفضاء الحقيقى"(٨).

وطبقا لما ذكره هورن وشيمونى وزايلنجر، فإن شرودنجر بالتالى فهم أن الدالة الموجية فى الفضاء النسبى لا يمكن تحليلها إلى عوامل، وهذا الأمر سمة مميزة للتعالق. وبعد ذلك بتسع سنوات، أى فى عام ١٩٣٥، أطلق شرودنجر فعليا على هذه الظاهرة اسم التعالق. وجاء تعريفه لها على النحو التالى:

عندما يدخل نظامان، نعرف حالتيهما ممثلتين على الترتيب، فى تفاعل فيزيائى مؤقت نتيجة قوى معلومة بينهما، وبعد فترة من التأثير المتبادل بينهما ينفصل النظامان

مرة أخرى، فإنه بعد ذلك لا يمكن وصفهما كما فى السابق ، بمعنى أن نضفى على كل منهما تمثيلا خاصا به. وأنا لن أؤكد أن ذلك هو السمة الوحيدة لميكانيا الكم، بل إنه السمة المميزة لها[٩].

وفى عام ١٩٢٧، تم اختيار شرودنجر ليخلف ماكس بلانك كأستاذ فى جامعة برلين، وفى عام ١٩٢٩ تم انتخابه أيضا عضوا فى أكاديمية العلوم ببروسيا. وبعدها فى مايو ١٩٣٣، استقال من منصبه تعبيرا عن اشمئزازه من انتخاب هتلر مستشاراً لألمانيا، ونفى نفسه إلى أوكسفورد. ونال شرودنجر جائزة نوبل عام ١٩٣٣ عن إنجازاته العظيمة فى الفيزياء. واقتسم الجائزة مع الفيزيائى الإنجليزى بول دايراك Paul Dirac، الذى قدم إسهامات مهمة لميكانيكا الكم، وتنبأ بوجود المادة المضادة اعتمادا على اعتبارات نظرية بحتة.

وعاد شرودنجر إلى النمسا ومنحته جامعة جراز Graz منصب الأستاذية، لكن مع هزيمة النازى للنمسا عام ١٩٣٨، هرب مرة أخرى إلى أوكسفورد. وعاد إلى القارة الأوروبية لعام واحد وقام بالتدريس فى Ghent، لكن مع اشتداد الحرب غادر إلى دبلن حيث أصبح هناك أستاذا للفيزياء النظرية وظل فى هذا المنصب حتى عام ١٩٥٦ . وأثناء إقامته بالمنفى فى أيرلندا، وفى ربيع ١٩٤٤، بات شرودنجر متورطا فى علاقة غرامية أخرى خارج إطار الزواج. وكان قد بلغ من العمر ٥٧ عاما، وتعلق بامرأة متزوجة صغيرة السن تدعى شيلا ماى جرين، وكتب فيها شعرا، وكان يذهب لمشاهدتها وهى تمثل بالمسرح، وأنجب منها طفلة صغيرة. وعرضت عليه آنى أن يطلقها ليتمكن من الزواج من شيلا، لكنه رفض. وانتهت العلاقة الغرامية، وقام دافيد – زوج شيلا – بتربية الطفلة رغم أنه انفصل عن شيلا فيما بعد. وفى عام ١٩٥٦، عاد إيروين أخيراً إلى فيينا، وتوفى بها فى عام ١٩٦١، وكانت بجواره زوجته آنى.

الفصل الثامن

ميكروسكوب هايزنبرج

"كى تنفذ إلى روح نظرية الكم، بوسعى القول، إنه لا يمكن هذا إلا فى كوبنهاجن فقط فى ذلك الحين".

ويرنر هايزنبرج

ولد ويرنر كارل هايزنبرج (١٩٠١-١٩٧٦) Werner Carl Heisenberg، خارج ميونيخ فى جنوبى ألمانيا، وحينما كان لا يزال مجرد طفل صغير، انتقلت أسرته إلى المدينة. وطوال حياته، كان يشعر بأنه فى وطنه وهو فى ميونيخ، وكان يعود إليها مرة بعد أخرى أيا كان المكان الذى يحيا به. وأثناء الاحتفال بعيد ميلاده الستين، الذى نظمته المدينة، قال: "من لم يجرِّب العيش فى ميونيخ فى العشرينات من عمره، فإنه لايدرك مدى روعة الحياة". وكان والده أوجست هايزنبرج أستاذا لمادة الفلسفة اليونانية بجامعة ميونيخ، وفى الواقع، كان هو الأستاذ الوحيد المتفرغ لفلسفة العصور الوسيطة والحديثة اليونانية فى ألمانيا. ونقل الأب إلى ابنه حب أفكار اليونانيين، لذلك ظل دائمًا وفيا فى حبه لأفلاطون. (ومن دواعى السخرية أن المفاهيم اليونانية القديمة عن الزمن والمكان والسببية ستصبح متعارضة مع الأفكار الجديدة التى جلبتها نظرية الكم التى ظهرت للوجود على يد هايزنبرج وزملائه). وأثناء وجوده بالمدرسة، بات مهتما بالفيزياء وقرر أن يمارس حياته المهنية كعالم، والتحق بجامعة ميونيخ، وبعد انتهائه من دراساته الجامعية ظل بها لدراسة الدكتوراه فى الفيزياء.

وفى عام ١٩٢٢، وهو ما يزال طالبا، شهد محاضرة عامة بالجامعة ألقاها نيلز بوهر، ورفع يده، ووجه سؤالاً صعبًا لبوهر. وبعد انتهاء المحاضرة، ذهب إليه بوهر وطلب منه أن يمضيا معًا فى نزهة. وسارا معا لمدة ثلاث ساعات، يتناقشان فى الفيزياء، ومن هنا كانت البداية لصداقة دامت طول العمر.

وبعد إتمام دراسته، ذهب هايزنبرج للالتحاق بمعهد بوهر فى كوبنهاجن وظل به فى الفترة من عام ١٩٢٤ حتى ١٩٢٧، ليتعلم اللغتين الدانمركية والإنجليزية وكذلك ليتابع دراساته الأخرى. وبحلول عام ١٩٢٤، وكان فى الثالثة والعشرين من عمره، كان قد كتب فعليا ١٢ بحثا حول ميكانيكا الكم، بعضها شاركه فيها الفيزيائيان الكبيران ماكس بورن وأرنولد سومرفيلد Arnold Sommerfeld. وغدا هايزنبرج المحاور (المريد) المفضل لبوهر، وغالبا ما كان يزور بوهر وزوجته مرجريت بمنزلهما. وما أن بدأ النقاش الكبير بين أينشتين وبوهر، تبنى هايزنبرج وجهة نظر بوهر قلبا وقالبا، بينما وقف شرودنجر إلى جانب أينشتين .. واستمر هذا التعالق بين بوهر وهايزنبرج طيلة حياتيهما.

وطور هايزنبرج نظرية فى ميكانيكا الكم مكافئة لنظرية شرودنجر، وقد استكمل كتابة نسخته قبل زميله الكبير بوقت قصير. وفى حين كانت مقاربة شرودنجر تستخدم معادلته الموجية، كان حل هايزنبرج يعتمد على المصفوفات Matrices. وهى من الناحية المفاهيمية كانت أكثر تحدياً. وتستخدم ميكانيكا المصفوفات أعداداً فى صفوف وأعمدة للتنبؤ بشدة الموجات الضوئية المنبعثة من مستويات طاقة متغيرة لذرات "مستثارة" فضلاً عن ظواهر الكم المتباينة.

واتضح فى وقت لاحق أن الطريقتين متكافئتان، ففى مقاربة هايزنبرج الأكثر تجريدا، تُمثِّل المصفوفات اللانهائية خواص كينونات تحت الملاحظة، والرياضيات المستخدمة هى حساب المصفوفات. ويذكر أن عملية ضرب المصفوفات ليست إبدالية، بمعنى، عند ضرب مصفوفتين A ، B على النحو AB ، فلن تكون الإجابة، فى صورتها

النهائية مساوية لناتج الضرب العكسى BA. وفى المقابل فإن حاصل ضرب الأعداد عملية إبدالية، (مثلا 35 = 5 x 7 = 7 x 5 ، أى أن الترتيب هنا لا يؤثر فى عملية الضرب ونحصل على نفس الإجابة بأى ترتيب). وعدم القابلية للإبدال فى عملية ضرب المصفوفات تنطوى على نتائج مهمة فى ميكانيكا الكم، تتجاوز بحث هايزنبرج.

وفى ميكانيكا الكم الحديثة، فإن كل ما هو تحت الملاحظة (كل عناصر النظام الكمى التى يمكننا ملاحظتها) تتمثل من خلال مؤثر Operator على الدالة الموجية للنظام. وبعض هذه المؤثرات يكون إبداليا، بمعنى أنه إذا طبقنا أحد المؤثرات، ثم مؤثر آخر على النظام بالترتيب AB ، سنحصل على نفس الإجابة إذا طبقنا المؤثرين بالترتيب العكسى أى: BA . أما باقى المؤثرات فليست إبدالية، بمعنى أن ترتيب تطبيق المؤثرات (وبالتالى ترتيب إجراء الملاحظات)، يوضع فى الاعتبار ونحصل على نتائج مختلفة فى كل حالة. على سبيل المثال، يكون قياس موضع جسيم فى ميكانيكا الكم مصحوبا بتطبيق موضع المؤثر بالنسبة للدالة الموجية، ويمكن قياس كمية حركة جسيم فى ميكانيكا الكم بتطبيق المشتقة الجزئية بالنسبة لموضع المؤثر من الدالة الموجية (كمية الحركة، العزم، p فى الميكانيا الكلاسيكية هى مشتقة الموضع بالنسبة إلى الزمن). والمؤثران: الموضع وكمية الحركة ليسا إبداليين، وهنا يعنى أننا لا نستطيع قياسهما معا، ذلك لأننا إذا قسنا أحدهما ثم قسنا الآخر، حصلنا على نتيجة مختلفة إذا أبدلناهما. والسبب، فى هذا المثال، فى عدم جواز إبدال المؤثرين، الموضع وكمية الحركة، يتضح لمن يعرف المبادئ الأولية لحساب التفاضل والتكامل.

مشتقة (X (Ψ)) = X + Ψ (مشتقة Ψ) ، وهى لا تساوى X (مشتقة Ψ)، وهذا تطبيق للمؤثرين فى الترتيب العكسى. والسبب فى الصيغة الأولى أعلاه هو تطبيق قاعدة أخذ مشتقة حاصل الضرب.

على أن حقيقة أن المؤثرين: X (موضع الجسيم)، ومشتقة (عزم الجسيم) ليسا إبداليين لها نتائج هائلة فى ميكانيكا الكم، إذ نعلم من ذلك أننا لا نستطيع قياس كل

من موضع الجسم وكمية حركته نفسه ونتوقع الحصول على دقة جيدة لكليهما. فإذا علمنا واحدا منهما بدقة كبيرة (الذى قسناه فى البداية) فإن الآخر سيتحدد بدرجة ضعيفة من الدقة. وهذه الحقيقة هى نتيجة رياضية لخاصية عدم الإبدال المتعلقة بالمؤثرين المصاحبين لهذين النوعين من القياسات. وهذه الحقيقة، بأن موضع الجسم وكمية حركته نفسه لا يمكن تحديدهما معا بدقة عالية تسمى مبدأ عدم التحدد (عدم اليقين) **Uncertainty Principle** ، وقد تم اكتشافه أيضا على يد ويرنر هايزنبرج. ومبدأ عدم التحدد لهايزنبرج هو الإسهام المهم الثانى له فى نظرية الكم بعد صياغته لميكانيكا المصفوفة.

ويعد مبدأ عدم التحدد لهايزنبرج من أساسيات ميكانيكا الكم، وهو الذى أدخل لميكانيكا الكم أفكار نظرية الاحتمالات على مستوى أصولها الأساسية. وينص على أن عدم التحدد (اليقين) لا يمكن إزالته من النظم الكمية. ويمكن كتابته على النحو التالى:

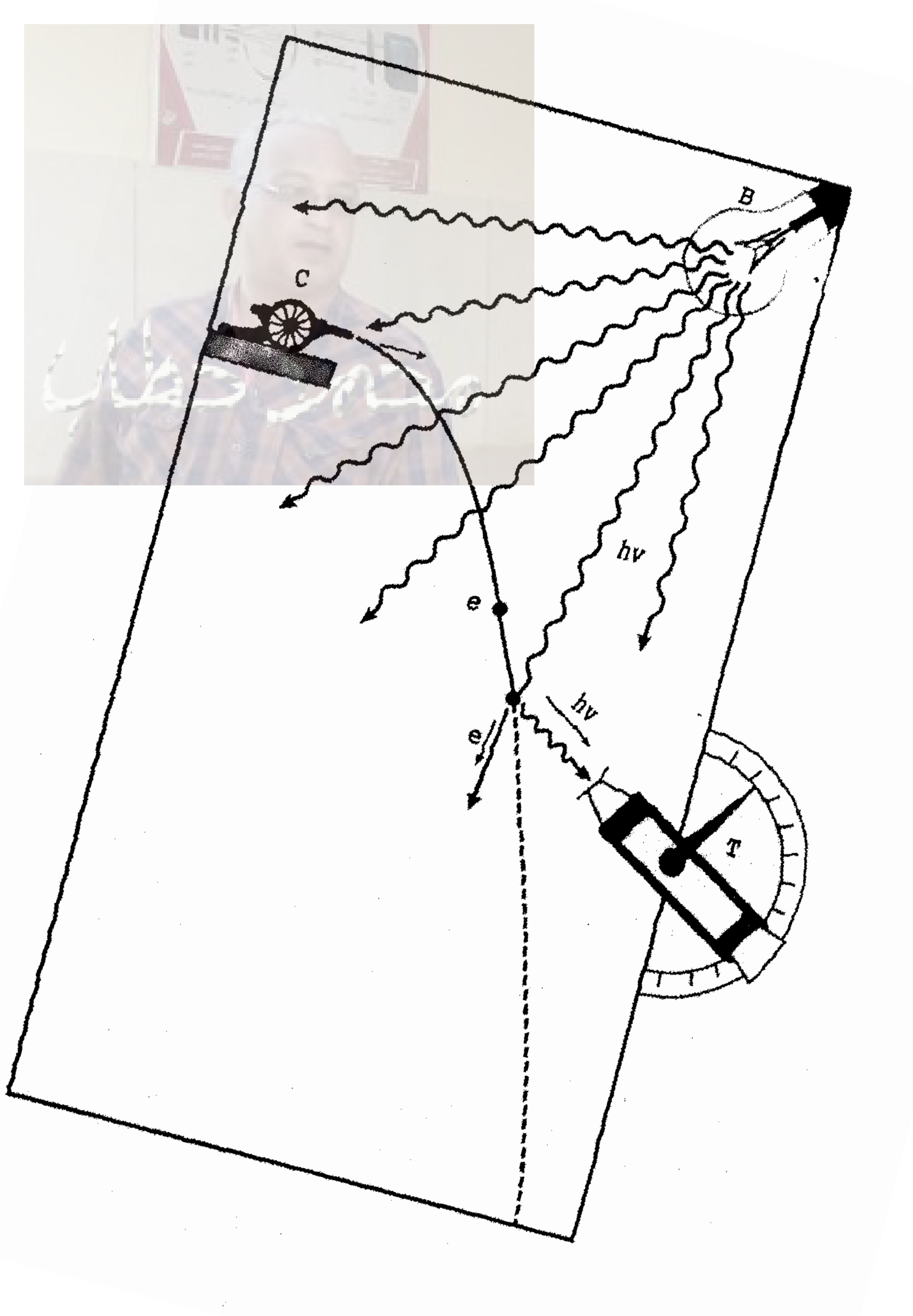
$$\Delta p \Delta x \geq h$$

وهنا Δp تمثل الفرق فى كمية الحركة أو عدم التحدد لها. كما أن Δx هى الفرق فى الموضع أو عدم التحدد له. ويعنى هذا المبدأ أن ناتج ضرب عدم تحدد موضع جسيم وعدم تحدد كمية حركة الجسيم نفسه أكبر من أو يساوى ثابت بلانك. وتنطوى هذه الصيغة التى تبدو بسيطة على مضامين هائلة. فإذا علمنا موضع الجسيم بدرجة عالية من الدقة، حينئذ فإننا لا نستطيع أن نعرف كمية حركته إلى درجة أفضل من مستوى معين من الدقة، بصرف النظر عن مدى اجتهادنا فى المحاولة أو جودة الأدوات التى نستخدمها. من الناحية الأخرى، إذا كنا نعلم كمية حركة جسيم بدقة عالية، حينئذ لا نستطيع تحديد الموضع تمامًا. ولا يمكن استبعاد عدم التحدد فى النظام على الإطلاق أو تقليله لأقل من مستوى معين يتحدد من خلال صيغة هايزنبرج.

وللبرهنة عمليا على مبدأ عدم التحدد عند تطبيقه على موضع وكمية حركة جسيم، نستخدم ميكروسكوب هايزنبرج **Heisenberg's Microscope** . ففى فبراير عام ١٩٢٧

ترك بوهر هايزنبرج ليعمل بمفرده فى كوبنهاجن، وذهب للتزحلق على الجليد مع أسرته فى النرويج. ولكونه وحيدا لاحت الفرصة لهايزنبرج ليهيم مع أفكاره، كما ذكر بعد ذلك، وقرر أن يجعل من مبدأ عدم التحدد النقطة المركزية فى تفسير نظرية الكم الوليدة. وتذكر نقاشا دار من قبل بينه وبين طالب زميل له فى جوتنجن، كان وراء فكرة بحث احتمالية تحديد موضع جسيم بالاستعانة بميكروسكوب يعمل بأشعة جاما. ورسّخت هذه الفكرة فى ذهنه المبدأ الذى كان قد توصل إليه فعليا دون هذا التشابه. وبسرعة كتب هايزنبرج رسالة إلى وولفجانج باولى Wolfgang Paull (رائد آخر فى نظرية الكم) يشرح له فيها تجربته الفكرية حول استخدام ميكروسكوب أشعة جاما لتحديد موضع جسيم، وعندما تلقى جواب باولى، استخدم الأفكار الواردة بالخطاب لتحسين البحث الذى كان يكتبه. وبعد عودة بوهر من النرويج، عرض عليه هايزنبرج ما كتبه، إلا أن بوهر لم يبد عليه الاقتناع. كان بوهر يريد أن ينطلق بحث هايزنبرج من الطبيعة الازدواجية للجسيمات والموجات. وبعد عدة أسابيع من نقاشه مع بوهر، أيقن هايزنبرج أن مبدأ عدم التحدد يرتبط تمامًا بالمفاهيم الأخرى لميكانيكا الكم، وغدا بحثه جاهزا للنشر.

ما هو ميكروسكوب هايزنبرج؟ يوضح الشكل التالى هذا الجهاز. حيث يُسلَّط شعاع من الضوء على جسيم لينعكس على العدسة، ومع انعكاس شعاع الضوء من الجسيم إلى الميكروسكوب، فإنه يبذل بعض الضغط على الجسيم الساقط عليه، مما يسبب له زيغا (انحرافا) عن مساره المتوقع. وإذا أردنا تقليل تأثير الضغط فى الجسيم، لكى لا نتسبب فى اضطراب كبير فى كمية حركته، فلابد من زيادة الطول الموجى. لكن عندما يصل الطول الموجى إلى مقدار معين، فإن شعاع الضوء الداخل إلى الميكروسكوب يخطئ موقع الجسيم. لذلك، بطريقة أو بأخرى ، فثمة حد أدنى لمستوى الدقة التى يمكن الحصول عليها لناتج ضرب الموضع وكمية الحركة.

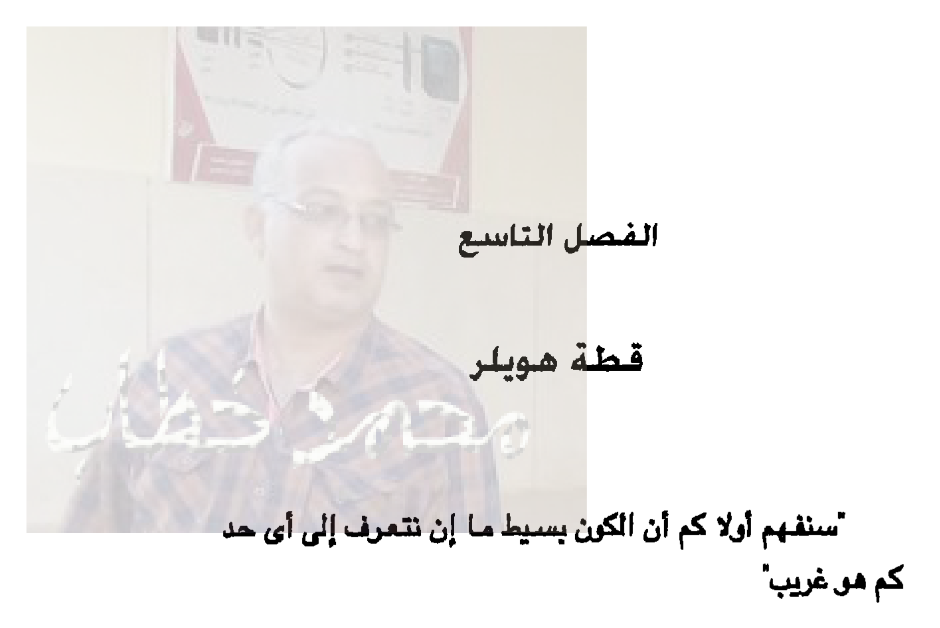


B
C
hν
e
e
hν
T

ومن الإسهامات المهمة الأخرى التى قدمها هايزنبرج لميكانيكا الكم، كان مناقشته لمفهوم الاحتمالية Potentiality داخل النظم الكمية. إذ يكمن الفرق بين ميكانيكا الكم والميكانيكا الكلاسيكية، فى أنه يوجد دائما الاحتمال فى عالم الكوانتم، إضافة إلى ما يمكن أن يحدث فعليا. وهذا أمر على جانب عظيم من الأهمية فى فهم التعالق؛ إذ إن ظاهرة التعالق هى ظاهرة كمية (كوانتم)، وليس لها تناظر كلاسيكى. فوجود الاحتمالات هو الذى يسفر عن التعالق، وبالأخص، فى نظام لجسيمين متعالقين. ويتضح التعالق فى احتمال حدوث كلا من AB (الجسيم الأول فى الحالة A والجسيم الثانى فى الحالة B) و CD (الجسيم الأول فى الحالة C والجسيم الثانى فى الحالة D) وسوف نسبر غور هذا الأمر أكثر.

شهدت ثلاثينيات القرن العشرين تغييرات عظيمة فى حياة هايزنبرج، والأمر نفسه بالنسبة إلى العلم. ففى عام ١٩٣٢، مُنح هايزنبرج جائزة نوبل عن عمله فى الفيزياء، وفى العام التالى، اعتلى هتلر السلطة وبدأ انهيار العلوم فى ألمانيا مع الإطاحة بالأكاديميين اليهود على يد النازى. وظل هايزنبرج مقيما فى ألمانيا، وهو يلاحظ أصدقاءه وزملاءه يرحلون إلى أمريكا وغيرها من البلدان. وفى ورقة SS (القوات العاصفة) سيئة السمعة وصم هايزنبرج بأنه "يهودى أبيض" وبأنه "ذو ميول يهودية، فى أعماقه وشخصيته" وذلك لتعاطفه الواضح مع زملائه اليهود. إلا أن هايزنبرج استمر مقيما فى ألمانيا النازية رغم نداءات زملائه له بالرحيل. رغم أن عواطفه الحقيقية مازالت غامضة، فقد سرت أقاويل بأن هناك علاقة بين عائلته وعائلة هيملر[١٠]. وقيل بأن هايزنبرج استخدم هذه العلاقة ليلتمس مباشرة من قيادة SS إيقاف النقد العنيف الذى يتعرض له. وفى عام ١٩٣٧، كان هايزنبرج، البالغ من العمر حينئذ ٣٥ عامًا، يعانى من الاكتئاب، والتقى بامرأة تبلغ من العمر ٢٢ عاما فى مكتبه فى لايبزج. كان الاثنان يتشاركان فى الاهتمام بالموسيقى، ويؤديان معزوفات معا، هو يغنى، وهى تصاحبه على البيانو. وفى غضون ثلاثة أشهر ارتبطا معا، وبعد فترة قصيرة تزوجا.

وفى عام ١٩٣٩، تم استدعاء هايزنبرج لأداء الخدمة العسكرية. وفى تلك الفترة كان هو الفيزيائى الرائد الوحيد فى ألمانيا، ولم يكن غريبا أثناء خدمته العسكرية أن يتوقع منه النازى مساعدتهم فى تطوير قنبلة نووية. وفى عام ١٩٤١، شيد هايزنبرج وزملاؤه مفاعلا نوويا، أخفوه فى كهف أسفل كنيسة فى قرية صغيرة، ولحسن الحظ، ولصالح البشرية، كان المشروع الأساسى لهتلر Peenemunde ، أى جهود النازى لتصنيع الصواريخ، التى كانت توجه لتضرب بريطانيا، أما المشروع النووى فكان يحتل مركزا متدنيا فى جدول الأولويات، وكما اتضح بعد ذلك، لم يكن هايزنبرج يعرف كيفية صنع قنبلة ذرية، وكان مشروع مانهاتن فى أمريكا متقدما جدا عن محاولات النازى. وبعد الحرب، ظل هايزنبرج عالما رائداً فى ألمانيا، ومن المحتمل أنه أخذ معه إلى قبره إجابات كثير من الأسئلة التى يطرحها الناس الآن، حول الدور الحقيقى الذى لعبه فى محاولة النازى لصنع قنبلة ذرية.



الفصل التاسع

قطة هويلر

"سنفهم أولا كم أن الكون بسيط ما إن نتعرف إلى أى حد
كم هو غريب"

جون أرشيبالد هويلر

روت كثير من الكتب المتعلقة بميكانيكا الكم القصة التى استخدمها شرودنجر لتوضيح مفارقة تعتمد على تراكب الحالات. وباتت هذه القصة معروفة باسم قطة "شرودنجر"؛ إذ تصور شرودنجر قطة داخل صندوق مقفل ومعها جهاز يحتوى على مقدار ضئيل جداً من مادة ذات نشاط إشعاعى، ويتكون جزء من الجهاز من كشاف يتحكم فى آلية يمكنها كسر قارورة مرفقة مملوءة بالسيانيد السام، فإذا حدث تحلل لذرة من العنصر المشع بحيث يمكن للكشاف تسجيله، تنكسر الزجاجة، وتموت القطة. ونظراً لأن تحلل المادة المشعة هو حدث كمى، فإن الحالتين – القطة حية والقطة ميتة – يمكن أن يتراكبا، وبالتالى، قبل أن نفتح الصندوق ونجرى قياسًا؛ بمعنى، قبل أن نكتشف فعليا ما إذا كانت القطة حية أو ميتة، فإن القطة تكون حية وميتة فى الوقت نفسه. وفضلاً عن المضامين غير السارة، فإن هذا المثال ليس تعليميا تماماً. وفى كتابه "The Quark and the Jaguar" يقول موراى جيل – مان Murray Gell- Mann إن قطة شرودنجر ليست مثالا أفضل من فتح صندوق يحتوى على قطة أمضت رحلة طيران طويلة فى مخزن العفش بطائرة، فإن صاحب القطة القادمة سيطرح بالتأكيد السؤال

المروع حين استلامه الصندوق من المخزن: هل قطتى ميتة أم حية؟ حسبما يقول جيل – مان إن المسألة فى مثال قطة شرودنجر مسألة عدم ترابط منطقى. فالقطة نظام كبير (ماكروسكوبى)، يُرى بالعين، وليست عنصرا فى عالم الكم الميكروسكوبى. والوضع كذلك، فإن القطة تتفاعل مع بيئتها بشكل واسع جدا، فهى تتنفس الهواء، وتمتص الإشعاع الحرارى وتلفظه، وتأكل وتشرب. لذلك، يستحيل أن تسلك القطة بالأسلوب الكمى بالغ الخصوصية، وتكون بيْن بيْن: "ميتة وحية"، مثل إلكترون فى عملية تراكب لأكثر من حالة.

ومازلت أفضّل استخدام مثال القطة لتوضيح هذه النقطة، لكن لا يلزمنا أن تكون القطة ميتة، وبالتالى لن يكون مثالنا مروعًا. وسوف نفكر فى أن القطة ستكون فى موضعين فى اللحظة نفسها، شأن ما يحدث للإلكترون، أو لنفكر فى أن الإلكترون مثل قطة، قطة هويلر.

كان لدى جون أرشيبالد هويلر قطة عاشت معه ومع أسرته فى برنستون. وكان منزل أينشتين يبعد عنه بمسافة قصيرة، ويبدو أن القطة كانت تحب منزل أينشتين . ولعل هويلر كان يرى أينشتين مرات كثيرة ذاهبا إلى منزله، محاطا بمساعديْه، وبالتأكيد، وبعد عدة دقائق، يرن جرس التليفون، ويكون أينشتين على الخط يسأله إن كان يريد منه أن يعيد إليه قطته. فلنتصور – بدلا من كون القطة ميتة أو حية فى الوقت نفسه كما فى مثال شرودنجر– أنها فى تراكب؛ بمعنى كونها فى منزل أينشتين وفى منزل هويلر. وعندما نجرى قياساً: أينشتين أو هويلر يبحث عن القطة، والقطة مجبرة على أن تكون فى حالة واحدة من الحالتين، تماماً مثل الجسيم أو الفوتون.

وتحتل فكرة تراكب الحالتين أهمية فى ميكانيكا الكم. فالجسيم يستطيع أن يكون فى حالتين فى الوقت نفسه. ولنفترض أن قطة هويلر يمكن أن تكون فى تراكب للحالتين. فالقطة بمقدورها أن تكون فى منزل ويلر وكذلك فى منزل أينشتين. وكما يحلو لميشيل هورن أن يلفت النظر فى ميكانيا الكم: علينا أن نقلع عن استخدام منطق التعبير المبتذل "إما أو" لصالح المنطق الجديد "معا – و". والجدير بالذكر حقا، أن المفهوم غريب

جداً لأننا لا نمارسه فى حياتنا اليومية. ربما، ما تزال هناك بعض الأمثلة التى بوسعنا أن نسوقها. إذا كنتُ فى البنك، وهناك طابوران أمام شبابيك الصراف الآلى. والطابوران متساويان فى الطول، ولا يوجد أحد يقف ورائى. وأريد أن أكون فى الطابور الذى يتحرك أسرع، لكننى لا أعرف أيهما سيكون الأسرع. سأقف بين الطابورين، وأظل انتقل من واحد منهما إلى الآخر حسب الطابور الأقصر. هنا أنا فى "الطابورين فى اللحظة نفسها". وأكون فى تراكب من الحالتين: (أنا فى الطابور الأول) و (أنا فى الطابور الثانى). وبالعودة إلى قطة هويلر تكون القطة فى تراكب للحالتين التاليتين:

(القطة فى منزل هويلر) و(القطة فى منزل أينشتين). بطبيعة الحال، فى الرواية الأصلية لقصة شرودنجر، تكون القطة فى تراكب حزين: (القطة ميتة) و(القطة حية).

ولد جون أرشيبالد هويلر فى جاكسونفيل، بولاية فلوريدا، عام ١٩١١ , وحصل على شهادته فى الدكتوراه لمادة الفيزياء عام ١٩٣٣ من جامعة جونز هوبكنز، كما درس الفيزياء مع نيلز بوهر فى كوبنهاجن، ونال منصب أستاذ الفيزياء بجامعة برنستون، وكان تلميذه النجيب هناك ريتشارد فينمان (١٩١٨–١٩٨٨). ونال فينمان بعد عدة سنوات جائزة نوبل وغدا واحدا من أشهر الفيزيائيين الأمريكيين، وكان قد كتب أطروحته المبهرة تحت إشراف هويلر، وأدت إلى حصوله على الدكتوراه من برنستون فى عام ١٩٤٢ . والموضوع الذى بحثه، انطلق من عمل سابق قام به بول ديراك Paul A.m.Diraic ، أدخل فكرة مهمة إلى ميكانيكا الكم، حيث كانت تطبيقا لمبدأ الفعل الأدنى بعالم الكم. وما فعله فينمان هو ابتداع مقاربة – sum over - histories (حاصل جمع التواريخ) لميكانيكا الكم. وهذه المقاربة تضع فى الاعتبار كل المسارات المحتملة التى يمكن لجسيم (أو نظام) أن يتخذها للانتقال من نقطة إلى أخرى. إذ إن كل مسار له احتماله الخاص، ولذلك من الممكن اكتشاف أكثر المسارات احتمالا التى يتخذها الجسيم. وحسب صيغة فينمان، أن السعات الموجية الملحقة بالمسارات المحتملة كلها تستخدم لاشتقاق سعة كلية – وبالتالى توزيع احتمالى – للناتج عند الحد المشترك للمسارات المحتملة جميعها.

وقد أثّرت بحوث فينمان بشدة فى هويلر، وحمل المخطوط الذى كتبه فينمان إلى أينشتين وسأله: "أليس هذا عملا رائعًا؟ ألا يجعلك هذا تصدق نظرية الكم؟" وقرأ أينشتين المخطوط، وفكر فيه لبرهة، ثم قال: "مازلت لا أصدق أن الله يلعب النرد.. لكن ربما كنتُ على صواب فى ارتكاب أخطائى"(١١).

كان بول ديراك (١٩٠٢ - ١٩٨٤) فيزيائيًا بريطانيا، بدأ حياته المهنية مهندسا للكهرباء، ونتيجة لما كابده من صعوبات التوظف فى مجال تخصصه، تقدم بطلب للالتحاق بجامعة كامبردج. وفى النهاية بات واحدا من ألمع الشخصيات الفيزيائية فى القرن العشرين، ونال جائزة نوبل. وقد طور ديراك نظرية تجمع بين (توحِّد) ميكانيكا الكم والنسبية الخاصة. وبالتالى أتاح عمله تصحيح معادلات ميكانيكا الكم الرياضية فيما يخص التأثيرات النسبية للجسيمات المتحركة بسرعات تقترب من سرعة الضوء. وكجزء من بحثه، تنبأ ديراك بوجود الجسيمات المضادة. وقد صدرت فى عام ١٩٣٠ ورقته حول الاحتمالية النظرية لإمكان وجود مضاد للجسيمات، وبعدها بعام اكتشف الفيزيائى الأمريكى كارل أندرسون Carl Anderson البوزيترون Positron ، وهو مضاد للإلكترون موجب الشحنة، وذلك أثناء تحليله للأشعة الكونية. وما أن يلتقى الإلكترون بالبوزيترون حتى يبيد أحدهما الآخر، وينتج زوج من الفوتونات.

وفى عام ١٩٤٦، افترض هويلر أن زوج الفوتونات الناتج عن إبادة البوزيترون والإلكترون أحدهما للآخر، يمكن استخدامه لاختبار نظرية ديناميكا الكم الكهربية. وحسب هذه النظرية، ينبغى أن يكون للفوتونين قطبية متعاكسة، إذا كان أحدهما مستقطبًا رأسيا، كانت قطبية الآخر أفقية. ومعنى "الاستقطاب" هو الاتجاه فى الفضاء الذى يتخذه إما المجال الكهربى أو المجال المغناطيسى للضوء.

فى عام ١٩٤٩، أجرت شين شيونج وو Chien - Shiung Wu المعروفة باسم مدام وو (فى محاكاة للأسلوب الذى يشير به الفيزيائيون إلى مارى كورى Marie curie) ومعها إيرفنج شاكنوف Irving Shaknov من جامعة كولومبيا، التجربة التى سبق واقترحها هويلر. وأسفرت تجربة وو، وشاكنوف عن إنتاج البوزيترونيوم، وهو عنصر اصطناعى

يتكون من إلكترون وبوزيترون يدور كل منهما حول الآخر. ويبلغ عمر هذا العنصر جزءاً من الثانية، ومن ثَمّ يتخذ الإلكترون والبوزيترون مدارا لولبيا حول بعضهما، الأمر الذى ينجم عنه إبادة متبادلة لكليهما ينطلق على إثْرها زوج من الفوتونات. واستخدم العالمان بلورات الأنثراسين(*) لتحليل اتجاه الاستقطاب للفوتونات الناتجة، وأكدت نتيجتهما تنبؤات ويلر: أن زوج الفوتونات لهما قطبية متخالفة. وكانت تجربة عام ١٩٤٩ لكل من وو، وشاكنوف هى التجربة الأولى فى التاريخ التى تسفر عن إنتاج فوتونين متعالقين، رغم أن هذه الحقيقة المهمة لم يكشف عنها النقاب إلا بعدها بثمانى سنوات، أى فى عام ١٩٥٧، على يد بوهم Bohm وأهارونوف Aharonov .

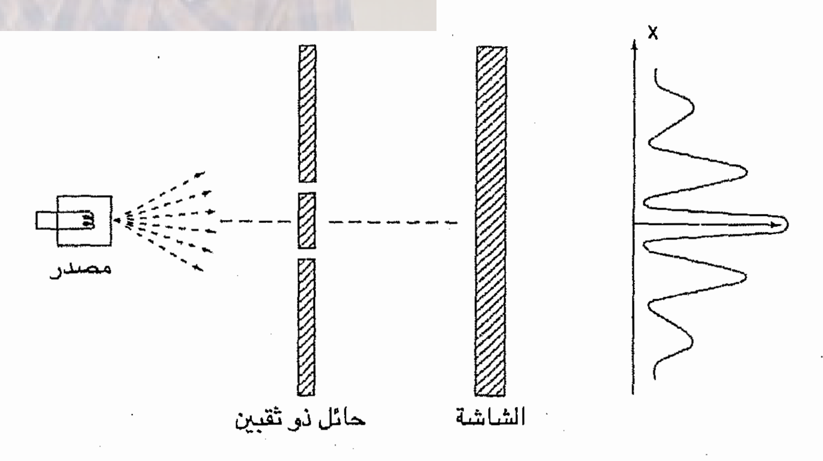
وقد قدم هويلر إسهامات مهمة لمجالات عديدة فى الفيزياء إضافة إلى ميكانيكا الكم، من بينها نظريات الجاذبية الأرضية والنسبية والكوزمولوجى (علم الكونيات). وكان وراء ابتداع تعبير الثقوب السوداء Black Holes ليصف به مفردة الزمن المكان Space time Singularity (الزمكان) الذى ينتج عندما يموت نجم هائل. وبالتعاون مع نيلز بوهر، اكتشف عملية الانشطار Fission . وفى يناير ٢٠٠١، وكان قد بلغ التسعين من عمره، داهمت هويلر أزمة قلبية، وتسبب المرض فى تغيير نظرته إلى الحياة، وقرر أنه كان يريد أن يقضى العمر الباقى له فى الاشتغال بأهم القضايا فى الفيزياء، وهى قضايا الكم.

واستنادا إلى هويلر، فإن قضية الكم (الكوانتم)، هى قضية الحياة، قضية الوجود. ويستعيد مفعما بالحيوية، ذكريات القصة التى يرويها كازيمير H.Casimir ، وكان طالب زمالة عند بوهر، عن الجدال الذى دار حول الكوانتم بين بوهر وهايزنبرج. كان الاثنان مدعوَّين من الفيلسوف هوفدنج Hoffding ، كصديق مشترك للاثنين، بمنزله لمناقشة تجربة الشق المزدوج ليانج ومضامينها فى الكوانتم، أين ذهب الجسيم؟ هل مر الجسيم من فتحة واحدة أو مر من الأخرى؟ ومع تطور النقاش، فكر بوهر فى المسألة مليا وغمغم: "أن تكون ... أن تكون .. ماذا تعنى بأن تكون؟"

(*) الأنثراسين Anthracene : مادة هيدروكربونية فى قطران الفحم . (المترجم)

على أن جون ويلر بنفسه فيما بعد نقل تجربة الشق المزدوج إلى مستوى جديد، فقد أوضح بأسلوب رائع لا لبس فيه أنه من خلال شكل مختلف لهذه التجربة، فحسب ومن خلال القياس، فإن التجريبي يستطيع تغيير التاريخ. فإذا تقرر هل نريد قياس شيء ما في اتجاه معين، أو في اتجاه آخر، فإن من يجرى التجربة، الإنسان، يستطيع أن يحدد "ما الذى كان سيحدث في الماضى Shall have happened in the past؟" والوصف التالى لتجهيزات تجربة ويلر مأخوذ من ورقته "القانون بدون قانون"[١٢] "Law without law".

وفى المقال وصف هويلر شكلا حديثا مختلفا لتجهيزات تجربة الشق المزدوج ليانج. والشكل التالى يوضح التجهيزات المعتادة لتجربة الشق المزدوج.

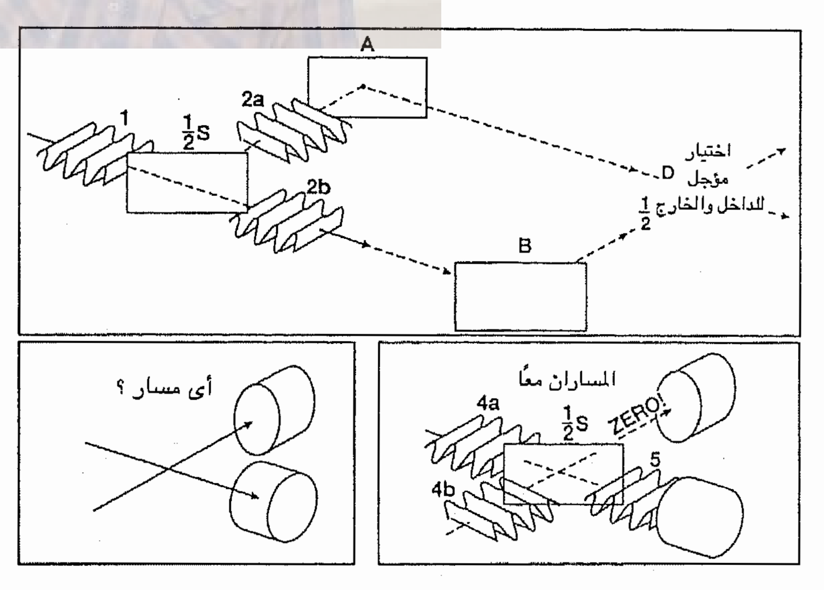


تصطدم أشعة الضوء بالحائل ذى الثقبين، وينجم عن التصادم فئتان من الموجات، كما يحدث لموجات الماء وهى تترك الثقبين، وتتفاعل موجات الضوء معًا فى أى موضع تلتقى فيه. ويحدث تداخل بنَّاء لتنتج موجة ذات سعة أكبر، وتداخل هدَّام، حيث يتلاشيان، أو تنتج موجات بسعة أصغر. وفى التجهيزات الجديدة تُستخدم المرايا بدلاً من الثقوب، كما تُستخدم أشعة الليزر، الذى يمكن التحكم فيه بدقة أعلى بكثير من الضوء العادى. وفى التجهيزات التجريبية الأكثر تطورا، تستخدم الألياف الضوئية Fiber Optics كالوسط المختار للتجارب.

وأبسط أنواع التجهيزات المناظرة لتجربة الشق المزدوج يتضح من الشكل التالى. فلدينا هنا تصميم على صورة معين، حيث يتجه الضوء من مصدر إلى مرآة نصف مفضضة تسمح بمرور نصف الضوء وبانعكاسه على النصف الثانى. وتسمى هذه المرآة مقسّمة (مجزّئة) الشعاع نظراً لأن الشعاع الساقط عليها ينقسم أثناء سقوطه إلى شعاعين: الشعاع المنعكس والشعاع المار. والأشعة هنا تنعكس على المرآة ويسمح لها بالمرور ليتم الكشف عليها. وبملاحظة الكشاف الذى ينبض لتسجيل سقوط الفوتون، يكون بمقدور التجريبى معرفة المسار الذى يتخذه الفوتون: هل انبعث الفوتون بواسطة مقسم الشعاع، أو هل انعكس خلاله؟ وبدلا من ذلك، يستطيع التجريبى وضع مقسم شعاع آخر (مرآة نصف مفضضة) مباشرة عند نقطة عبور الشعاعين. ويتيح وضْع المرآة على هذا النحو تداخل الشعاعين مع بعضهما، كما يحدث تماما فى تجربة الشق المزدوج. وهنا، سوف يطقطق كشاف واحد (حين يتداخل الشعاعان تداخلا بناءً) بينما لن يعمل الكشاف الآخر (حيث يكون التداخل عنده هدامًا). وعندما يحدث هذا فى تجربة تستخدم ضوءاً بالغ الضعف لا يبث إلا فوتونا واحدا فى زمن معين، نجد أن الفوتون يتخذ المسارين – فهو ينعكس وينفذ عند مقسم الشعاع الأول (وإلا سيحدث تداخل: الكشافان يطقطقان، وهو ما لا يحدث).

ويقول هويلر إن أينشتين – الذى استخدم فكرة مشابهة فى تجربة فكرية – ذكر أنه: "من غير المعقول أن يتخذ الفوتون الواحد مسارين فى اللحظة نفسها، فإذا أبعدنا المرآة نصف المفضضة، لوجدنا أن أحد جهازى العد ، أو الآخر لا يعمل. وبالتالى قد اتخذ الفوتون مسارا واحدا. لقد اتخذ مسارا واحدا، لكنه اتخذ كلا المسارين، إنه يتخذ المسارين، لكنه يتخذ مسارا واحداً فقط. يا له من سخف. إلى أى حد يتضح أن نظرية الكم تعانى من التضارب: لقد أكد بوهر أنه لا يوجد أى تضارب. نحن نتعامل مع تجربتين مختلفتين. تجربة تستبعد فيها المرآة نصف المفضضة لتحدد لنا المسار. وتجربة تستخدم المرآة نصف المفضضة تثبت أن الفوتون يتخذ المسارين، لكن من المستحيل إجراء التجربتين فى وقت واحد(١٣).

وطرح هويلر السؤال التالى: هل يستطيع القائم بالتجربة أن يحدد المسار الذى يتخذه الفوتون؟ إذا أزاح التجريبى مقسم الشعاع الثانى، لأشار الكشافان إلى المسار الذى اتخذه الفوتون. وإذا ظل مقسم الشعاع الثانى فى مكانه، فإننا نعلم من حقيقة أن كشافا واحد يطقطق وليس الآخر أن الفوتون اتخذ المسارين. وقبل اتخاذ قرار حول ما إذا كان يجب إدخال مقسم الشعاع، يمكن لنا فقط وصف الفوتون فى مقياس التداخل بكونه فى حالة ضمن احتمالات متعددة (نظرا لأن الاحتمالات يمكن أن تتواجد معا) ويحدد خيار إدخال أو عدم إدخال مقسم الشعاع الاحتمال الذى يتحقق فعليا. والشكل التالى يوضح الجهازين:



الأمر المذهل، استنادا إلى هويلر، أنه من خلال خيار مؤجل، يستطيع التجريبى تغيير التاريخ. فبإمكانه أن يحدد هل يضع أو لا يضع مقسم الشعاع الثانى بعد أن يقطع الفوتون معظم المسافة إلى نهاية مساره. ويتيح العلم الحديث لنا أن نختار عشوائيًا الإجراء الذى نتخذه (وضع مقسم الشعاع أو عدم وضعه) بسرعة هائلة – خلال جزء بالغ الضآلة من الثانية – حتى يتمكن الفوتون من قطع مساره بالفعل. وعندما نفعل

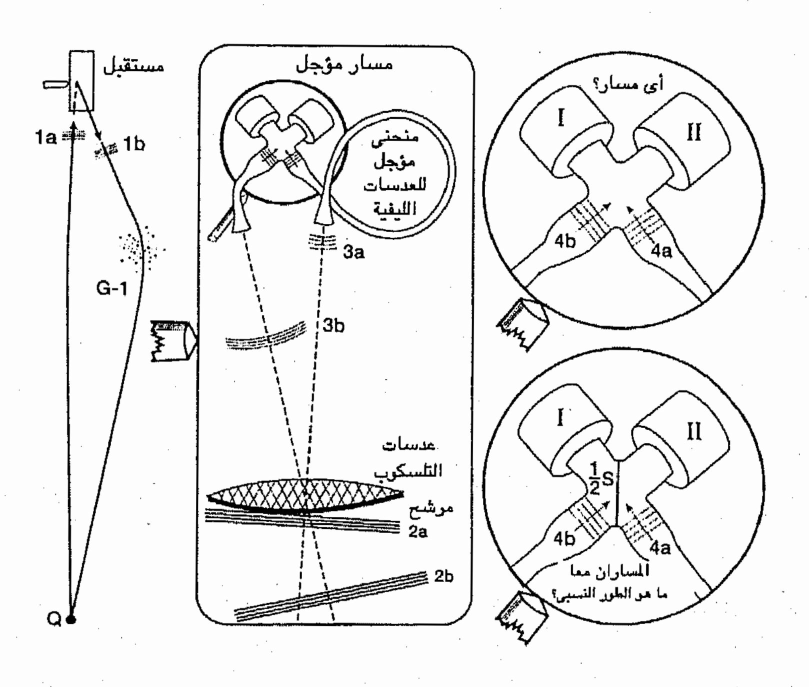
ذلك، نكون قد حددنا، بمقتضى الحقيقة، المسار الذى كان سيتخذه الفوتون. هل كان سيمضى فى مسار واحد، أو كان سيمضى فى كلا المسارين؟

وعقب ذلك مضى هويلر بفكرته غير المألوفة إلى المستوى الكونى(١٤)، وطرح عدة تساؤلات: "كيف نشأ الكون؟ هل تكون هذه النشأة جزءا من عملية غريبة موغلة فى بعدها، وتتجاوز أى أمل فى تحليلها؟ أو هل الآلية التى تمت بها تتجلى أمامنا فى كل وقت؟". وهكذا ربط هويلر بين الانفجار العظيم Big bang وخلْق الكون يعزوه إلى حدث كمى، وفعل ذلك قبل سنوات من توصل علماء الكوزمولوجى فى ثمانينيات وتسعينيات القرن العشرين إلى فكرة أن المجرات نشأت بسبب تموجات كمية للضباب الأولى (الحساء) المصاحب للانفجار العظيم. وفى إجابة هويلر عن عملية الخلق، والتاريخ، وميلاد الكون أنه ينبغى علينا أن نتطلع إلى تجربة الخيار المؤجل. وهذه التجربة "تمتد إلى الوراء فى تناقض واضح مع النظام المعتاد للزمن – الترتيب الطبيعى". ويسوق مثال Quasar (الكوازار)(*) المعروف باسم ٠٩٥٧ + ٥٦١ A,B ، والذى اعتقد العلماء فى الماضى أنه مجرتان، لكنهم يعتقدون الآن أنه جسم واحد. وينقسم الضوء الصادر من هذا الجسم حول مجرة تعترض المسار بيننا وبينه، وتعمل هذه المجرة كما لو كانت "عدسة جاذبة" حولها تنقسم أشعة الضوء الصادرة من الكوازار. وتأخذ المجرة شعاعين ضوئيين، يقطعان مسارهما فى ٥٠ ألف سنة ضوئية بعيدا عن الكرة الأرضية ثم تعيدهما ليصلا معا إلى سطح الأرض. ونستطيع إجراء تجربة خيار مؤجل لشعاع منقسم صادر من الكوازار باعتباره يعمل مثل مرآة نصف مفضضة، واعتبار المجرة كأنها المرآتان الكاملتان فى التجهيزات التجريبية المستخدمة فى المعمل. ولذلك أصبح لدينا تجربة كمية من المستوى الكونى. وبدلاً من مسافة لا تتجاوز عدة أمتار كما يحدث فى المعمل، نصبح هنا أمام تجربة أبعادها ملايين السنوات الضوئية. إلا أن المبدأ لا يتغير.

ويقول هويلر: "نحن ننهض فى الصباح ونقضى النهار نتردد بين ما إذا كان علينا أن نلاحظ عن طريق أى مسار أو نلاحظ التداخل بين "المسارين". ومع قدوم الليل

(*) الكوازار اكتشف عام ١٩٦٤، أحد الأجرام الكونية الذى يشبه النجوم وإن كان على أبعاد سحيقة جداً منها ويبث مقادير هائلة من الإشعاع مثل اللون الأزرق الساطع والأشعة فوق البنفسجية وموجات الإشعاع عموما . (المترجم)

ويكون التلسكوب فى نهاية عمله، نستبعد المرآة نصف المفضضة أو نضعها، حسبما نختار. وتنخفض معدلات قياسات المرشح اللونى (الفلتر) الموضوع على التلسكوب. وقد نضطر إلى الانتظار ساعة كاملة لوصول الفوتون الأول. وعندما يظهر تأثيره فى العداد، نكتشف عن طريق أى مسار جاء بواسطة واحد من التجهيزات، أو بواسطة الآخر، وما هو الطور النسبى للموجات المصاحبة لمسار الفوتون من مصدره حتى استقباله عن طريق المسارين- ربما يفصل بينهما ٥٠ ألف سنة ضوئية وهما يعبران المجرة التى تعمل عمل العدسة g-1 – لكن الفوتون ربما يكون قد اجتاز هذه المجرة فعليا منذ بلايين السنين قبل أن نتخذ قرارنا. وبهذا المعنى، مع التبسيط الشديد، نقرر من خلاله ما الذى كان سيفعله الفوتون بعد أن يكون قد انتهى منه بالفعل. وفى الحقيقة من الخطأ الكلام عن "مسار" الفوتون؛ إذ إن الأسلوب المناسب هنا الذى نؤكده مرة أخرى، أنه لا معنى للحديث عن ظاهرة حتى تصل إلى نهايتها بنوع من التكبير غير المنعكس: لا تعتبر أى ظاهرة أولية فى عداد الظواهر إلا إذا أصبحت ظاهرة مسجلة (ملحوظة)".





الفصل العاشر

الرياضى المجرى

"مع هذا،أعلم بالفعل، أنه طالما كان بوهر فى برنستون، فإنه غالبًا ما كان يناقش نظرية القياس مع جونى فون نيومان البارز فى هذا المجال. ووفقًا لما أرى، أفضت هذه الأفكار المتروية إلى إسهامات، إسهامات مهمة، فى الرياضيات أكثر منها فى الفيزياء".

إبراهام بيز Abraham Pais

ولد جانكسى (جونى) نيومان Jancsi (Johnny) Neuman فى بودابست فى ٢٨ ديسمبر عام ١٩٠٣، لعائلة ثرية تعمل بالبنوك. وفى الفترة بين عامى ١٨٩٠ إلى ١٩١٠ شهدت بودابست ازدهارا اقتصاديا غير مسبوق، وهاجر إليها الكثير من الموهوبين من الريف المجرى ومن باقى الدول سعيًا وراء الفرص التى أتاحتها هذه العاصمة الأوروبية النامية بقوة. وبحلول عام ١٩٠٠ كانت بودابست تتباهى بأن بها ٦٠٠ مقهى، والكثير من المسارح، وأوركسترا سيمفونى ودارا للأوبرا شهيرين، ونظامًا تعليميًا كان موضع حسد أوروبا. وتهافت على بودابست الناس ذوو الطموح والاجتهاد، حيث نالوا فرص تحقيق النجاح فى الحياة الاقتصادية النامية بالمدينة. وكان بين الوافدين الجدد كثير من اليهود الذين اندفعوا أفواجًا من كل أنحاء أوروبا إلى مدينة تشتهر بتسامحها الدينى وسكانها المستنيرين(١٥).

وجاء والدا جونى، ماكس ومرجريت نيومان، إلى بودابست من بلدة بيكس Pecs على الحدود اليوغوسلافية، شأن الكثير من اليهود فى ذلك الحين، فى أواخر القرن التاسع عشر. وعمل ماكس بجد وكوفئ على عمله بسخاء، وغدا فى غضون سنوات قليلة مسئولاً نافذاً فى بنك مجرى ناجح، ازدهر من جراء إقراض النقود لأصحاب الأعمال الصغيرة وكذلك المشروعات الزراعية. وأحرز ماكس نجاحا كبيراً، فى الواقع، حتى إنه فى عدة سنوات استطاع أن يشترى لأسرته شقة تتكون من ١٨ غرفة فى مبنى يقطنه الكثير من الأسر اليهودية الثرية، ومن بينها أسرة شقيق زوجته. وكان أطفال الأسرتين يتجولون بين طوابق المبنى معا، يركضون داخل الشقتين الفخمتين وخارجهما.

وعلاوة على النجاح المالى، حقق ماكس نيومان درجة من النفوذ فى السياسة المجرية. وبوصفه شخصية كبيرة فى المجتمع المجرى ومستشاراً مالياً ناجحاً للحكومة المجرية، تم منحه فى عام ١٩١٣لقب نبيل يورَّث لأبنائه. وهو يقابل لقب فارس الذى تمنحه ملكة إنجلترا. وبالإضافة إلى هذا التشريف الكبير – وهو نادر الحدوث لليهود – بات فى مقدور ماكس إضافة اللقب فون von فى أول اسمه. وصار ماكس فون نيومان، عضوا فى طبقة النبلاء المجريين. وتمتع أبناؤه : جون، وهو مولوده الأول، وميشيل ونيكولاس بنفس الامتياز. وفى سن العاشرة أصبح بالتالى الصغير جانكسى نيومان يطلق عليه جون فون نيومان، وكان طوال حياته يعتز بوضعه كنبيل أوروبى. حتى إن الأسرة كانت ترسم شعارات النبالة الخاصة بها، وتشمل: أرنبا، وقطا، وديكًا. وكان ماكس يعتقد أن جونى يشبه الديك لأنه اعتاد أحيانًا أن يصيح كالديك، وأن ميشيل يشبه القط، أما نيكولاس الأصغر، فإنه كالأرنب. وعرضت أسرة فون نيومان شعارات النبالة الخاصة بها فى شقتهم الفخمة بالمدينة، وكذلك على بوابة المزرعة الريفية المترفة التى اشتروها فيما بعد حيث كانوا يقضون بها فصل الصيف، ولم تقتصر الأسرة على عضويتها فى الطبقة الأرستقراطية الهنجارية، بل أضحوا من المدافعين الأوفياء عنها. وبعد أن أسست بيلا كون Bela Kun الحكم الشيوعى عام ١٩١٩، انتقل ماكس فون نيومان إلى فيينا واستدعى الأدميرال هورثى لمهاجمة قوات كون واستعادة المجر، لتحريرها من الشيوعيين للمرة الأولى (حدث ذلك مرة أخرى عقب انهيار الاتحاد السوفييتى).

في عام ١٩١٣ الحاسم، حين حازت الأسرة لقب النبالة، وأعلنت الحرب في أنحاء أوروبا، بدأت تظهر على جوني قدرات ثقافية مذهلة، حتى إنه بمضي الوقت أصبح منعزلاً عن باقي أفراد الأسرة، أو أي أشخاص من حوله. وقد تم اكتشاف هذا الأمر على نحو بسيط للغاية، عندما سأل (الأب) طفله البالغ من العمر عشر سنوات أن يذكر حاصل ضرب عددين. فتمكن الصبي من الإجابة بسرعة مدهشة، بعدها طلب ماكس منه حاصل ضرب عددين يتكون كل منهما من رقمين، وأجاب الطفل إجابة صحيحة في ثوان معدودة. وكانت مفاجأة مذهلة للأب وأدرك أن ابنه ليس طفلا عادياً. كان جوني موهوبا خارج تصورات أي شخص.

ولم يتكشف إلا لاحقا أن جوني وهو في المدرسة يعرف المواد التي يدرسها أكثر مما يعرفها مدرسوه. وفي نقاشات الأسرة التي كانت تدور حولِ مائدة الغداء كان يتجاوز بكثير جميع أفراد الأسرة في استيعابه للموضوعات والأفكار المثارة.

وما أن فطن أبواه إلى أن وليدهما الأول موهوب على نحو استثنائي، لم يضيعا الفرصة من أجل إعداده للمجد. فاتفقا مع معلمين خصوصيين بالأجر لتدريس الرياضيات والعلوم المتقدمة له. وقاد الأب مناقشات ثقافية حول مائدة الغداء كان من المتوقع أن يساهم فيها كل فرد بالأسرة. وأتاح هذا للعبقري الصغير صقل مهاراته.

وفي سن الحادية عشرة، أرسله أبواه إلى "الجيمنازيوم"، وهو معهد أوروبي يناظر المدرسة الثانوية، كان يقبل في المعتاد التلاميذ الأكبر سنا من ذلك بعدة أعوام. وهناك درس جوني الرياضيات، واليونانية، واللاتينية، وغيرها من المواد الدراسية. ونبغ فيها جميعا. وعلى الفور أدرك لاسلو راتز، أحد مدرسي الرياضيات بالمدرسة، أن لديه في فصله طالبا عبقريا. وذهب إلى ماكس فون نيومان واقترح على الأسرة أن توفر لابنها تعليما أكثر في الرياضيات. وتم ترتيب أن يتولى راتز تدريس الرياضيات لجوني خارج الفصل الدراسي المعتاد ثلاث مرات في الأسبوع في دروس خصوصية. وسرعان ما أدرك راتز أن جوني يعرف أكثر مما يعرفه. وأخذه راتز إلى جامعة بوادبست. وهناك التحق الطفل – بالتأكيد كان أصغر طالب يلتحق بالجامعة على الإطلاق – في فصول لدراسة الرياضيات المتقدمة.

• ويعد عام من انضمامه للجامعة، سأله أحد زملائه الطلاب (الأكبر منه بعدة سنوات) إن كان قد سمع عن فرضية معينة في نظرية الأعداد. وكان جونى على علم بالفرضية – إذ كانت نتيجة لم يُبرهن على صحتها بحث أمرها كثير من الرياضيين – وسأله زميله (الذى نال جائزة نوبل بعد عدة سنوات) إذا كان يمكنه إثبات صحتها. ولبث جونى يعمل على الفرضية لعدة ساعات، حتى أمكنه البرهنة عليها. وفي غضون عام التحق بالجامعة الفنية الشهيرة في زيوريخ، الـ ETH (وهى الكلية التى تخرج منها أينشتين)، وبعدها بفترة قصيرة التحق بجامعة برلين، وفى المعاهد الثلاثة أذهل أساتذة الرياضيات المشاهير، ومن بينهم دافيد هلبرت (١٨٦٢–١٩٤٣) ذائع الصيت، لفهمه الحاذق للرياضيات، وقدراته التي لا تصدق على حساب وتحليل المسائل بسرعة لا تبارى.

وأثناء حل أى مسألة رياضية، يدير فون نيومان وجهه للحائط، ووجهه خال تماما من أى تعبير، ويغمغم بينه وبين نفسه لعدة دقائق. مستغرقًا تماما في المسألة، لا يرى أو يسمع شيئا مما يحدث حوله. ثم فجأة يستعيد وجهه تعبيره المعتاد ويستدير بعيداً عن الحائط وفى هدوء يعلن إجابة المسألة.

ولم يكن جونى فون نيومان هو المثقف البارز الوحيد الذى أنتجته بودابست خلال تلك السنوات. فإن ستة من الحاصلين على جائزة نوبل أنجبتهم بودابست بين عامى ١٨٧٥ و ١٩٠٥ (خمسة منهم من اليهود). كما أن هناك أربعة من رواد العلوم الحديثة والرياضيات ولدوا فى بودابست أيضا فى غضون هذه الفترة. وجميعهم التحقوا بالمدارس الممتازة بالمجر، والمدارس الثانوية "الجيمنازيوم" ونشأوا بهذا البلد. وبعد نصف قرن من ذلك، سئل يوجين فيجنر Engene Wigner – أحد هؤلاء العباقرة العشرة والحاصل على جائزة نوبل – عن رأيه فى تعليل هذه الظاهرة. أجاب فيجنر بأنه لم يفهم السؤال، وقال "إن المجر لم تنجب إلا عبقريًا واحدًا، اسمه جون فون نيومان".

وقد هاجر معظم العباقرة المجريين إلى الولايات المتحدة، حيث ظهر تأثيرهم عميقًا على تطور العلوم الحديثة. وما أن وصلوا إلى أمريكا حتى أذهلت مواهبهم

الخاصة المجتمع العلمى، وبدأ البعض نصف جاد يتوقع أن هؤلاء العلماء الأجانب ليسوا مجريين، بل إنهم غرباء من الفضاء الخارجى صمموا على الهيمنة على العلوم فى أمريكا. وكان تيودور فون كارمان Theodore von Karman أول من وصل ضمن عشرة علماء إلى أمريكا. وتبعه إدوارد تيللر Edward Teller وآخرون، منهم جون فون نيومان، وذلك فى ثلاثينيات القرن العشرين. وبمجرد وصول تيللر، فوجئ بالقصة الخاصة بأنهم من خارج الكرة الأرضية وأنهم هذه الأرواح الحارسة. واتخذت ملامح تيللر تعبيرا يدل على الانزعاج ثم قال: " لابد أن فون كارمان قد تكلم".

بيد أنه قبل الهجرة إلى الولايات المتحدة كان جونى فون نيومان - بلا جدال الأعظم عبقرية بينهم جميعا - قد تلقى مزيدا من التدريب الراقى فى الرياضيات والعلوم، مما ساعده على الارتقاء ليغدو واحدا من أعظم علماء الرياضيات فى عصره. وقد أتم هذا التدريب فى جامعات زيوريخ، وجوتنجن، وبرلين.

وفى عام ١٩٢٦، ذهب فون نيومان إلى جوتنجن واستمع إلى محاضرة ألقاها ويرنر هايزنبرج عن ميكانيكا المصفوفة والفرق بين مقاربته لميكانيكا الكم ومقاربة شرودنجر (تقريبا المحاضرة نفسها التى استمع إليها المؤلف فى بيركلى بعد ٤٦ عاماً). ومن بين المستمعين أيضاً كان ديفيد هيلبرت، أعظم الرياضيين فى عصره. واستناداً إلى نورمان ماكرا Norman Macrae فى كتابه (John von Neumann AMS,) ، الصادر عام ١٩٩٩، لم يفهم هيلبرت نظرية الكم كما عرضها هايزنبرج وطلب من مساعده أن يشرحها له. وشاهد فون نيومان الواقعة وقرر أن يشرح نظرية الكم لعالم الرياضيات العجوز بلغة يستطيع فهمها، أى، بلغة الرياضيات. ولكى ينفذ ذلك، استخدم فون نيومان أفكار فضاء هيلبرت Hilbert Space ، الأمر الذى أبهج هيلبرت كثيرا.

وإلى يومنا هذا، يستخدم الفيزيائيون فضاء هيلبرت لشرح وتحليل عالم الجسيمات الدقيقة، وفضاء هيلبرت متجه موضع خطى فى الفراغ له معيار Norm (مقياس للمسافة) وله خاصية الاكتمال Completeness .

وقد وسّع فون نيومان الورقة التى كتبها لهيلبرت فى عام ١٩٢٦ لتصبح كتابا يسمى The Mathematical Foundations of Quantum Mechanics ، وصدر عام ١٩٣٢ . وأوضح فون نيومان أن هندسة المتجهات على المستوى المركب لها الخواص التقليدية نفسها لحالات النظام الميكانيكى الكمى. أيضًا اشتق فرضية، مستخدما بعض الفروض عن العالم الفيزيائى، أثبتت أنه ليس ثمة "متغيرات خافية" يمكن بتضمينها تقليل عدم التحدد (اليقين) فى النظم الكمية. وفى حين أن الأجيال القادمة قد تتفق مع النتيجة التى توصل إليها، فقد عارض جون بل John Bell بنجاح فروض فون نيومان فى أوراقه الجسورة فى ستينيات القرن العشرين. وعلى الرغم من هذا لا يزال فون نيومان أحد واضعى الأسس الرياضية لنظرية الكم، ويحظى عمله بأهمية فى إرساء النماذج الرياضية للظواهر الفيزيائية التى يتعذر تفسيرها فى عالم الكم. وأحد المفاتيح المهمة من بين هذه المفاهيم هى فكرة فضاء هيلبرت.

وتجدر الإشارة إلى أن فضاء هيلبرت، الذى يرمز له بالرمز H ، هو فضاء متجه خطى كامل (كلمة كامل تعنى أن تسلسل العناصر فى هذا الفضاء تتجمع مع عناصر الفضاء). وكما فى تطبيقات الفيزياء، يتحدد الفضاء من بدايته إلى نهايته بالأعداد المركبة، اللازمة لمنح الفضاء الثراء الضرورى لجعله نموذجا مناسبا فى الأوضاع المختلفة. كما أن الأعداد المركبة هى الأعداد التى تتضمن العنصر i، وهو الجذر التربيعى لسالب واحد. ويتيح فضاء هيلبرت للفيزيائيين التعامل مع حساب المتجهات، بمعنى: التعبيرات التى تحتوى على المقدار والاتجاه - بوضع أسهم صغيرة فى فضاء هيلبرت. ويمكن إضافة أو طرح هذه الأسهم، وضربها فى الأعداد. وهذه الأسهم من الأسس الرياضية للنظرية الفيزيائية لأنها تمثل حالات للنظم الكمية.

وانتقل فون نيومان إلى معهد الدراسات المتقدمة فى برنستون أوائل ثلاثينيات القرن العشرين. ولم يحدث أن التقى قط مع أينشتين وجها لوجه. وكانت الاختلافات بينهما غالبا اختلافات سياسية - فقد كان فون نيومان يرى أن أينشتين رجل ساذج، أما هو فيعتقد أن جميع الحكومات التى تميل إلى اليسار نظم ضعيفة تدعم سياسات

محافظة على نحو دوجماتي. وقد اشترك في مشروع مانهاتن Manhaten Project ، وعلى عكس أغلب العلماء الذين أسهموا في صنع القنبلة الذرية، لم تظهر على الإطلاق معاناته من أى أزمات أخلاقية نتيجة لهذا العمل.

وكانت حقيقة الإسهامات الكبيرة التى قدمها فون نيومان لنظرية الكم خارج نطاق أى تساؤلات. وأضحى كتابه في ذلك الموضوع أداة لا غنى عنها للممارسين، ومعالجة مهمة للأسس الرياضية لميكانيكا الكم.

وقد جاء إلى برنستون يوجين فيجنر، الذى فاز فى وقت لاحق بجائزة نوبل عن عمله فى الفيزياء، وذلك بعد أن كان جون فون نيومان قد استقر فعليا هناك. وقال البعض إن فيجنر قد تعاقدت معه برنستون من المجر كى لا يبقى "جونى" وحيداً، وليجد شخصًا يستطيع أن يتبادل الحديث معه بالمجرية. وعندما ظهر كتاب فون مان – المبدع – باللغة الإنجليزية، قال فيجنر لأبنر شيمونى Abner Shimony : "تعلمت الكثير عن نظرية الكم من جونى، لكن محتوى الفصل السادس (عن القياس) فقد تعلمه بالكامل جونى منى". وقد احتوى كتاب فون نيومان على معالجة كانت لها أهمية فى النقاشات التالية فى تفسيرات ميكانيكا الكم، خاصة البرهان الذى قدمه بأن نظرية الكم لا يمكن أن "تستكمل" عن طريق نظرية المتغيرات الخافية، التى تقول إن كل عنصر ملحوظ تقابله قيمة محددة. وجاء برهانه على هذا الافتراض صحيحا من الناحية الرياضية، لكنه اعتمد على فرضية أثار الفيزيائيون الشك فيها من وجهة نظرهم. وهذا الخلل فى كتاب فون نيومان كشف عنه جون بل بعد عدة عقود.


محمد خطاب

الفصل الحادى عشر

ثم يدخل أينشتين

"العمليات الأولية التى تجعل تأسيس نظرية حقيقية للإشعاع تعتمد على الكوانتم، تبدو غالبًا أمرا لا مفر منه".

ألبرت أينشتين

ولد ألبرت أينشتين فى أولم Ulm جنوبى ألمانيا، فى عام ١٨٧٩ لعائلة يهودية من الطبقة الوسطى. وكان والده وعمه يمتلكان شركة تعمل فى مجال الكيمياء الكهربية، كانت تُمْنى بالخسائر دائمًا. ونتيجة لذلك؛ انتقلت الأسرة إلى ميونيخ، ثم إلى مكانين آخرين شمالى إيطاليا، وفى النهاية عادت إلى ألمانيا، وأتم أينشتين تعليمه فى سويسرا، وكما هو معروف حصل على وظيفة فى بداية عمله كخبير فنى فى مكتب براءات الاختراع السويسرى فى برن Bern. وهناك، فى العام ١٩٠٥، أصدر ثلاث ورقات غيرت العالم، وتضمنت الورقات الثلاث شروحه للنظريات الثلاث التى طورها أثناء عمله وحيداً فى مكتب براءات الاختراع: النظرية الخاصة للنسبية، ونظرية عن الحركة البراونية Brownian Motion بصياغة جديدة للديناميكا الحرارية الإحصائية، والثالثة نظرية عن التأثير الكهروضوئى.

أما حياة أينشتين وتطويره لنظريتى النسبية – فقد نالا حقُّهما من العروض المسهبة[١٦]. إلا أن أينشتين أثر تأثيرا بالغ الأهمية فى نظرية الكم فى بداياتها. وعقب قراءته مباشرة لورقة بلانك عن الكوانتم عام ١٩٠٠، شرع أينشتين يفكر مليا فى طبيعة

الضوء من وجهة نظر النظرية الجديدة. وطرح فرضية تقول بأن الضوء هو تيار من الجسيمات، أو الكمّات.

ودرس أينشتين تأثير تفاعل الضوء مع المواد. وكان معلوما أن أشعة الضوء عندما تصطدم بفلز، تنبعث إلكترونات. ويمكن الكشف عن هذه الإلكترونات وقياس طاقاتها. وقد أمكن إثبات ذلك باستخدام عدد من التجارب أجراها الفيزيائى الأمريكى روبرت ميليكان (١٨٦٨ - ١٩٥٣) Robert Millikan وكشف تحليل التأثير الكهروضوئى على معادن مختلفة، باستخدام أشعة ضوئية ذات ترددات مختلفة عن الظواهر التالية: عند استخدام أشعة ضوئية منخفضة التردد حتى تصل إلى تردد معين يسمى تردد العتبة threshold ν_0، يتألق سطح المعدن، ولا تنبعث إلكترونات ضوئية. وإذا تجاوز التردد هذا الحد، تنبعث الإلكترونات الضوئية، ومع تغيير شدة الضوء لنفس التردد، يحدث تغير مماثل فى عدد الإلكترونات الضوئية لكن تظل طاقتها ثابتة. وتتزايد طاقة الإلكترونات الضوئية فقط بزيادة التردد. أما تردد العتبة ν_0 فإنه يعتمد على نوع الفلز المستخدم.

ولم تكن النظرية الكلاسيكية للضوء قد توصلت إلى تفسير الظاهرة السابقة. لماذا لا تتسبب شدة الضوء فى زيادة طاقة الإلكترونات الضوئية؟ ولماذا يؤثر التردد فى طاقة هذه الإلكترونات؟ ولماذا لا تنطلق إلكترونات ضوئية مع الترددات الأدنى من مستوى معين؟ وما فعله أينشتين فى بحثه الذى بلغ أوجه فى ورقة ١٩٠٥ كان افتراضه أن الضوء يتكون من جسيمات - سميت فيما بعد فوتونات - وكذلك تطبيقه لفكرة الكوانتم التى طرحها بلانك على هذه الفوتونات.

وفى رأى أينشتين أن الفوتونات عبارة عن حزم صغيرة منفصلة من الطاقة تنطلق فى الفضاء. وتتحدد طاقاتها من خلال صيغة أينشتين الرياضية ($E = h\nu$ حيث h ثابت بلانك ، ν تردد الضوء).

والعلاقة بين هذه الصيغة، ومعادلة بلانك السابقة علاقة بسيطة. فإذا استعدنا ما قاله بلانك بأن مستويات الطاقة الوحيدة الممكنة لنظام انبعاث ضوئى (أى، شحنة متذبذبة) تتحدد على النحو التالى:

$$E = 0, h\nu, 2h\nu, 3h\nu, 4h\nu....,$$

أو بصورة عامة $nh\nu$ ، حيث n عدد صحيح موجب.

ويتضح تماماً، أن أصغر مقدار من الطاقة يمكن انبعاثه من النظام هو الفرق بين أى قيمتين متجاورتين فى صيغة بلانك، أى $h\nu$، ومن هنا جاءت صيغة أينشتين لطاقة أصغر كمية ممكنة من الضوء.

ونرى من صيغة أينشتين أن شدة الضوء لا تؤدى إلى زيادة طاقة الفوتونات المنبعثة منه، بل تؤثر فى زيادة عدد الفوتونات المنبعثة، أما طاقة كل فوتون فإنها تتحدد من خلال تردد الضوء (مضروبا فى ثابت بلانك). ومن أجل فك ارتباط إلكترون من شبكة من الذرات فى فلز، يلزم استخدام حد أدنى من الطاقة، يرمز لها بالرمز W (وهو يقابل "الشغل"- أى الشغل اللازم لإزاحة إلكترون واحد). وعلى ذلك إذا بلغ التردد حدا أدنى معينا، فإن الطاقة التى يكتسبها الإلكترون تتجاوز العتبة W ، وينطلق الإلكترون. ويتحدد قانون أينشتين الذى يوضح التأثير الكهروضوئى من العلاقة : $K = h\nu - W$

حيث K هى طاقة حركة الإلكترون المنطلق، وهذه الطاقة تساوى طاقة أينشتين ($E = h\nu$) مطروحا منها الحد الأدنى اللازم لإزاحة الإلكترون. وهذه الصيغة توضح تماماً التأثير الكهرضوئى. وهذه النظرية الرائعة عن تفاعل الضوء مع المواد – وهى نظرية كمية عن تأثير معروف لكن أسىء فهمه فى السابق – هى التى أتاحت لأينشتين نيل جائزة نوبل عام ١٩٢١ . وقد بلغه نبأ حصوله على الجائزة أثناء زيارة له إلى اليابان. والمثير أن أينشتين لم يحصل على جائزة نوبل لعمله فى النظرية النسبية الخاصة، أو النظرية النسبية العامة، وهاتان النظريتان بمثابة ثورة فى العلم الحديث.

وهكذا كان أينشتين موجودا هناك حين ولدت نظرية الكم، وكان واحدا من "آباء" النظرية الجديدة. وكان يشعر بأنه قد فهم الطبيعة فهما تاماً، كما اتضح من حقيقة أنه استطاع أن يقدم مثل هاتين النظريتين الثوريتين (الجذريتين): النظرية الخاصة فى

النسبية فى عام ١٩٠٥ والنظرية العامة فى النسبية فى عام ١٩١٦ - اللتان تفسران ظواهر كثيرة فى عالم الأجسام الكبيرة والسريعة. وعلى الرغم من أنه كان أستاذا لا يبارى فى فيزياء عالم الأجسام الكبيرة، وقدم إسهامات جليلة لنظرية الكم التى تبحث فى الجسيمات الدقيقة - فإن فلسفة أينشتين اصطدمت مع التفسيرات المتطورة لميكانيكا الكم؛ فلم يستطع أن يتخلى عن اعتقاده بأن الله لا يلعب النرد، وهو يقصد بذلك أن الصدفة لا مكان لها فى قوانين الطبيعة. وكان يعتقد أن ميكانيكا الكم على حق فى أن تضفى الاحتمالات على النواتج الممكنة لأى تجربة، لكنه كان يرى أن حاجتنا للجوء إلى الاحتمالات هى نتيجة لجهلنا لمستوى أعمق فى النظرية، التى توصف بأنها الفيزياء اليقينية (الحتمية) deterministic physics (بمعنى، الخالية من التركيب الاحتمالى). وذلك هو معنى ما ينسب دائما إلى مقولته عن الله والنرد.

وكانت نظرية الكم، ومازالت، تعتمد على الاحتمالات أكثر من اعتمادها على التنبؤات المضبوطة. وكما يذكر مبدأ عدم التحدد لهايزنبرج: يستحيل معرفة كلا من كمية حركة الجسيم وموضعه - فبمعرفة أحدهما بدقة معينة، فإن الآخر، بالضرورة، يمكن معرفته بدرجة ليست يقينية. لكن العشوائية، والتغير، والتشوش، وعدم التحدد فى النظرية الفيزيائية الجديدة تتجاوز ما يتضح جليا من مبدأ عدم التحدد. وعلينا أن نتذكر أن الجسيمات والفوتونات هى معا موجية وجسيمية وأن كلا منها لها دالة موجية. ما هى هذه الدالة "الموجية"؟ إنها شىء ما يفضى مباشرة إلى الاحتمالات، نظرا لأن مربع سعة الموجة التى تصاحب أى جسيم هى، فى الواقع، توزيع احتمالى (القاعدة التى تحدد احتمالات النواتج المختلفة) لموضع "جسيم". وللحصول على التوزيع الاحتمالى لناتج قياس الكميات الأخرى موضع الملاحظة (مثل كمية الحركة)، يتعين على الفيزيائى أن يجرى عملية حسابية تستخدم كلا من الدالة الموجية والمؤثر الذى يمثل الكمية موضع الملاحظة.

على أن نظرية الكم هى نظرية احتمالية فى جوهرها، حتى فى مستوياتها الأساسية. ولا يمكن التهرب من الاحتمالات بصرف النظر عما نفعله. فثمة حد أدنى لعدم التحدد فيما يخص النتائج، ولا يمكن الإقلال منه على الإطلاق، طبقًا للنظرية، أيا كان الجهد

الذى نبذله. وبالتالى فإن نظرية الكم تختلف تمامًا عن النظريات الأخرى التى تستخدم الاحتمالات. ففى علم الاقتصاد، على سبيل المثال، لا توجد نظرية تقول على نحو مطلق أننا لا نستطيع أن نعرف بعض المتغيرات إلى مستوى محدد من الدقة نرغب فيه. هنا، تمثل الاحتمالات افتقارنا إلى المعرفة، وليس خاصية أساسية فى الطبيعة. وكان أينشتين من كبار موجهى الانتقاد لنظرية الكم لأنه لم يكن يحب أن يعتقد أن الطبيعة تعمل على نحو احتمالى. الله يقضى بكل شىء، وهو لا يلعب النرد. ولذلك كان أينشتين يعتقد أن ثمة شيئا ما غائبا عن نظرية الكم، ربما بعض المتغيرات، فإذا استطعنا العثور على قيم هذه المتغيرات – لذهب إلى غير رجعة: عدم التحدد، والعشوائية و"زهر النرد". وبزيادة هذه المتغيرات، يمكن استكمال النظرية وبالتالى تغدو مثل نظرية نيوتن، التى تتحدد من خلالها تماما قيم المتغيرات والمقادير والتنبؤ بها بدقة هائلة.

وعلاوة على كراهيته للعشوائية والاحتمالات فى نظرية عن الطبيعة، كانت لدى أينشتين بعض الأفكار بعضها "تخمينى"، والأخرى كانت كذلك لدى أغلب الناس. وتشمل هذه الأفكار تلك المتعلقة بالواقعية والموضع. كان من رأى أينشتين أن لأى مظهر من مظاهر الواقع شيئا ما واقعيا (حقيقيا) يجب أن تتضمنه أى نظرية جيدة عن الطبيعة. فإذا حدث شىء ما فى مكان ما، وأمكننا التنبؤ بأنه سيحدث دون التسبب فى اضطراب النظام، إذن فإن ما يحدث هو عنصر من عناصر الواقع. وإذا وضع جسيم فى نقطة معينة، واستطعنا التنبؤ بأنه سيكون هناك دون التسبب فى اضطرابه، إذن فإنه عنصر للواقعية. وإذا دار جسيم بسرعة فى اتجاه معين، وأمكننا التنبؤ أنه سيدور فى هذا الاتجاه دون التسبب فى اضطرابه إذن فهو عنصر من عناصر الواقع. أما الموضع فهو الفكرة الحدسية بأن شيئا يحدث فى مكان معين لا ينبغى أن يتأثر قط بما يمكن أن يحدث فى موقع بعيد عنه، بطبيعة الحال فيما عدا، بث إشارة للموقع الآخر (بسرعة أقل من أو تساوى سرعة الضوء، كما تنص على ذلك النظرية النسبية الخاصة)، ويمكن أن تتسبب فى حدوث اختلاف هناك.

وطوال حياة أينشتين، تمسك لأقصى حد بهذه المبادئ الثلاثة التى كان يعتقد أنه يتعين أن تكون جزءًا من أى وصف جيد للطبيعة :

١ – ينبغى وصف المستوى الأساسى للطبيعة من حيث المبدأ من خلال نظرية يقينية (حتمية)، حتى لو كانت الفجوات فى المعرفة البشرية بشأن الشروط الأولية والحدية قد تضطر البشر إلى الاستعانة بالاحتمالات فى إجراء التنبؤات حول نتائج ما هو موضع الملاحظة.

٢ – ينبغى للنظرية أن تشمل كل عناصر الواقع.

٣ – ينبغى للنظرية أن تكون موضعية: ما يحدث هنا يعتمد على عناصر من الواقع موضعها هنا، وأيا كان ما يحدث هناك، فهو يعتمد على عناصر من الواقع موضعها هناك.

وقد وجد أينشتين والمشاركون معه أن هذه الأفكار، التى تبدو طبيعية تماماً لهم، تشير إلى أن نظرية الكم نظرية غير كاملة ، وهى النظرية التى ساعد أينشتين نفسه فى ظهورها. وكما سوف نرى، اتضح فى النهاية أن المبادئ المذكورة أعلاه لا تتوافق مع نظرية الكم، لكن ذلك لم يتبين إلا فى ستينيات القرن العشرين فحسب. كما أن الأدلة التجريبية المتزايدة التى تجمعت منذ سبعينيات القرن العشرين تقدم المزيد من دعم صواب نظرية الكم.

فى ربيع عام ١٩١٠، طرح رجل الصناعة البلجيكى إرنست سولفاى **Ernest Solvay** فكرة تنظيم مؤتمر علمى. وكان انبثاق هذه الفكرة قد سلك إلى حد ما طريقا غير مباشر وعجيبا. كان سولفاى قد طور أسلوبا لتصنيع الصودا وأسفر ذلك عن ثرائه البالغ. ومنحه هذا قدراً عاليًا من الثقة فى قدراته الخاصة. ونظراً لأنه كان مهتماً بالعلوم، فقد شرع يشتغل فى الفيزياء كهاو مبتدئ. وابتدع سولفاى نظرية فى الجاذبية الأرضية والمادة، كانت بعيدة عن الواقع أو العلم. لكن نظراً لثرائه الفاحش، فقد وجد من بين الناس من يستمع إليه، حتى لو كان بمقدورهم أن يعرفوا أن نظرياته تافهة. وقال له العالم الألمانى والتر نيرست **Walther Nerst** إنه يمكن جذب مستمعين لنظرياته إذا نظم مؤتمرا لكبار الفيزيائيين فى ذلك العصر، وعرض عليهم نظرياته. وراقت له الفكرة، ومن هنا ولدت فكرة مؤتمرات سولفاى **Solvay Conferences** .

وعقد مؤتمر سولفاى للمرة الأولى بفندق متروبول فى بروكسل فى أواخر أكتوبر عام ١٩١١ . وأرسلت الدعوات إلى أشهر الفيزيائيين، ومنهم أينشتين، وبلانك، ومدام

كورى، ولورنتز، وآخرين، ووافق جميع المدعوين وحضروا إلى ما أصبح اجتماعا تاريخيا. واستمر المؤتمر يعقد بعد ذلك لمدة عقدين. وكانت جلساته فيما تلا ذلك ساحات قتال للخلاف المحتدمْ حول نظرية الكم. وهنا فى بروكسل، فى المؤتمرات التالية، تجادل بوهر وأينشتين حول المضامين الفلسفية والفيزيائية لميكانيكا الكم.

وكان أينشتين معجبا ببوهر منذ إصدار بوهر لورقته الأولى عام ١٩١٣ حول نظرية الكم للذرات. وفى أبريل ١٩٢٠، ذهب بوهر إلى برلين ليلقى سلسلة من المحاضرات. وكان أينشتين يشغل موقعا فى تلك المدينة بالأكاديمية البروسية للعلوم. والتقى الرجلان، وأمضى بوهر بعض الوقت مع أسرة أينشتين فى منزلهم. وكان قد أحضر لهم بعض الهدايا: زبدة دانمركية ممتازة وغيرها من المواد الغذائية. واستمتع أينشتين وبوهر بنقاشات خلابة حول الإشعاع والنظرية الذرية. وبعد رحيل بوهر، كتب إليه أينشتين: "من النادر فى حياتى أن يهبنى شخص هذا القدر من السعادة لمجرد وجوده مثلما كان منك. وأنا الآن أدرس إصداراتك العظيمة – وما لم أكن مشغولا فى مكان آخر – فمن دواعى سعادتى أن أرى أمامى وجهك الطفولى البشوش، مبتسما وشارحًا"[١٧].

وبمرور الأعوام، نضجت علاقتهما لتغدو منافسة ودية بحثا عن الحقيقة فى الطبيعة. فقد كان بوهر، الشارح المتشدد لنظرية الكم، يدافع عن أوجهها غير المألوفة، فى حين أن أينشتين، الواقعى، ظـل دائمًا يدفع فى اتجـاه نظرية أكثر "طبيعية"، وهذا الأمر، للأسف، لم يتحقق على يديه أو على يدى أى شخص آخر.

وقد بدأ الجدال يتخذ منحى جاداً بين أينشتين وبوهر حول تفسير ميكانيكا الكم خلال مؤتمر سولفاى الخامس فى أكتوبر ١٩٢٧ . وكان بالمؤتمر كل مؤسسى نظرية الكم: بلانك، وأينشتين، وبوهر، ودى برولى، وهايزنبرج، وشرودنجر، وديراك. وفى الاجتماعات.. " تحدث أينشتين بالكاد عن أى شىء دون أن يقدم ولو اعتراضا بسيطا للتفسير الاحتمالى... ثم التزم الصمت"[١٨]. لكنه فى غرفة الطعام بالفندق كان مفعما بالحيوية. واستنادا إلى قصة رواها للمرة الأولى أوتو شتيرن Otto Stren : "تقدم أينشتين لتناول طعام الإفطار وعبّر عن توجساته حول نظرية الكم الجديدة. وطوال الوقت كان يبتدع بعض التجارب الجميلة (الفكرية)، التى يُفهم منها عدم فاعلية

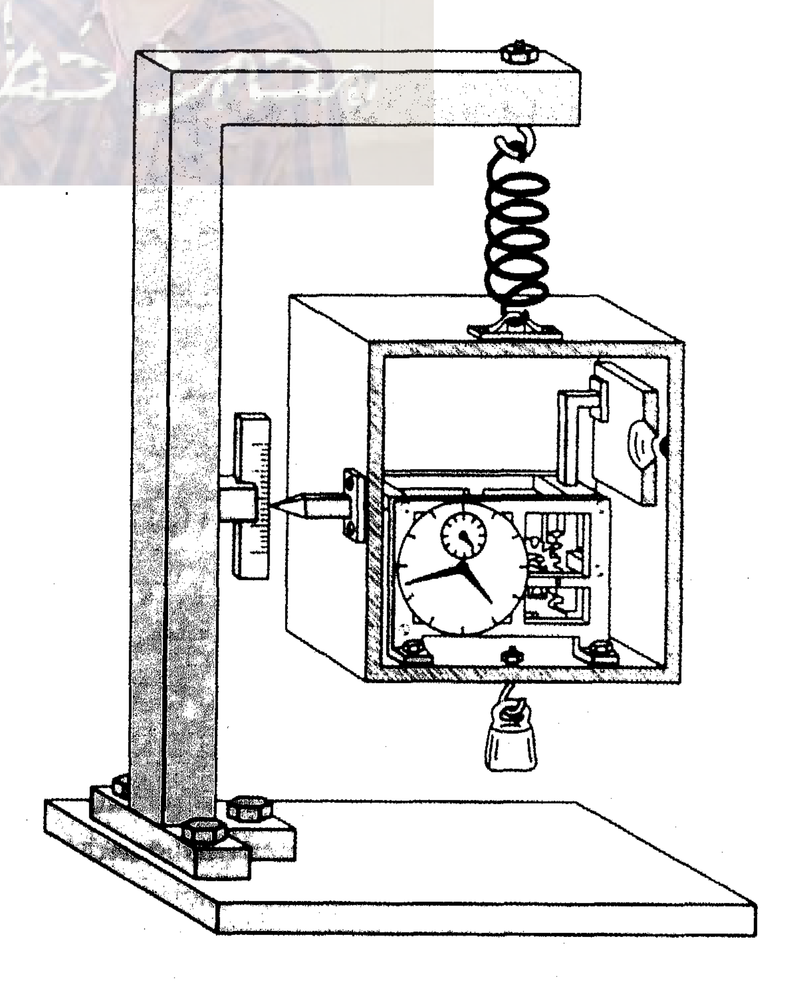
النظرية. ولم يستجب باولى وهايزنبرج، اللذان كانا هناك، لما كان يقول .. وجاء الرد (آه، جميل، سيكون كل شيء على ما يرام، كل شيء سيكون على ما يرام). أما بوهر، من الجانب الآخر، فقد اهتم بما يقول، وفى المساء، مع تناول العشاء كنا جميعا معه وأوضح بوهر الموضوع بالتفصيل"[١٩].

وكان هايزنبرج من المشاركين المهمين فى مؤتمر عام ١٩٢٧، الذى وصف الجدال أيضًا: "تركزت المناقشات سريعا فى شكل مبارزة ثنائية بين أينشتين وبوهر على مسألة إلى أى مدى يمكن اعتبار النظرية الذرية فى شكلها الحالى حلا نهائيًا للصعوبات التى نوقشت طيلة عدة عقود. ولقد عقدنا كلنا اجتماعًا أثناء تناول الإفطار بالفندق، وبدأ أينشتين يقدم وصفا لتجربة مثالية، كان يعتقد أنها تكشف عن التناقضات الداخلية لتفسير كوبنهاجن"[٢٠].

وانهمك بوهر طوال اليوم ليجد جوابا عن تساؤلات أينشتين، وفى نهاية فترة ما بعد الظهيرة رأى أن يشرح معالجته لزملائه علماء الكوانتم. وفى وقت العشاء، راح يعرض على أينشتين إجابته عن اعتراضه الذى أثاره فى الصباح. ورغم أن أينشتين لم يقدم أى اعتراض وجيه على هذه المعالجة، فقد ظل فى قرارة نفسه غير مقتنع. واستنادا إلى هايزنبرج، فإن الصديق الحميم لأينشتين وهو بول إيهرنفست Paul Ehrenfest (١٨٨٠ – ١٩٣٣) قال له: "اعترانى الخجل منك. لقد وضعت نفسك فى نفس موقف خصومك أثناء محاولاتهم التافهة لدحض نظريتك عن النسبية".

واشتدت الجدالات لصالح نظرية الكم وضدها فى مؤتمر سولفاى التالى، الذى جرت وقائعه فى عام ١٩٣٠ . وكان موضوع الاجتماع هو المغناطيسية، لكن ذلك لم يمنع المشاركين من مواصلة جدالهم الساخن حول نظرية الكم خارج الجلسات المقررة، فى الممرات، وعلى موائد الإفطار والعشاء فى الفندق. ذات مرة، أثناء الإفطار، قال أينشتين لبوهر إنه وجد مثالا مضاداً لمبدأ عدم التحدد فى الطاقة والزمن. كان أينشتين قد وضع تصورا لجهاز معقد، يدل على البراعة، عبارة عن صندوق به فتحة فى أحد جدرانه، عليها باب متحرك، تتحكم فيه ساعة داخل الصندوق. يتم ملء الصندوق بالإشعاع ويقدر وزنه. يفتح الباب لجزء من الثانية، ليسمح بخروج فوتون واحد،

ثم يزن الصندوق مـرة أخـرى. ومن الفـرق فى الوزن، يمكن حـسـاب طاقـة الفـوتون باستخدام صيغة أينشتين $E=mc^2$. وكما يقول أينشتين يمكن لنا من حيث المبدأ بأى مستوى من الدقة تحديد قيمة كل من طاقة الفوتون وزمن مروره، وهو ما يدحض مبدأ عدم التحدد (الذى يقول، فى هذا السياق، إنه لا يمكن معرفة كل من زمن المرور والطاقة بدرجة عالية من الدقة). والشكل التالى يوضح جهاز أينشتين:



وكما ذكر بيز Pais (١٩٩١) ، فإن المشاركين بالمؤتمر وجدوا بوهر فى حالة ذهول. لم يستطع أن يجد مخرجا لتحدى أينشتين لنظرية الكم. وظل طوال المساء يعانى من تعاسة شديدة، ينتقل من شخص إلى آخر محاولا إقناعهم بأن استنتاج أينشتين لا يمكن أن يكون صحيحا: لكن كيف؟ كان أينشتين على حق، قال بوهر: لابد أنها نهاية الفيزياء. ورغم محاولاته المستميتة، لم يستطع أن يدحض أطروحة أينشتين البارعة. على أن ليون روزنفيلد Leon Rosenfeld (1904-1974) – أحد الفيزيائيين الذين كانوا بالمؤتمر – قال: "لن أنسى أبدا منظر الغريمين وهما يغادران النادى: أينشتين بطوله المهيب، يمشى باتزان تعلو وجهه ابتسامة ساخرة خفيفة، بينما بوهر يهرول بجواره، بالغ الاستثارة .. بيد أن صبح اليوم التالى أشرق بانتصار بوهر"[٢١].

وفى النهاية اكتشف بوهر خللا فى معالجة أينشتين؛ فقد أخفق أينشتين فى أن يضع فى الاعتبار حقيقة أن وزن الصندوق لم يتغير مع تغير موضعه فى مجال الجاذبية الأرضية. إن عدم الدقة فى حساب إزاحة الصندوق يؤدى إلى عدم اليقين فى حساب كتلة – وبالتالى طاقة – الفوتون. فمع تحريك الصندوق، تتحرك أيضًا الساعة الموجودة بداخله. إذ تطلق دقاتها فى ذلك الحين فى مجال للجاذبية الأرضية يختلف قليلا عما كان فى البداية. ومعدل دقات الساعة فى الوضع الجديد يختلف عن معدلها قبل تحريكها من خلال عملية الوزن. ولذلك فثمة عدم يقين فى حساب الزمن. وكان بوهر قادراً على إثبات أن عدم التحدد فى علاقة الطاقة والزمن يماثل تمامًا ما تم حسابه فى مبدأ عدم التحدد.

وجاء رد بوهر على تحدى أينشتين مبهراً، فقد استخدم هذا الرد النظرية العامة للنسبية التى اكتشفها أينشتين بنفسه فى درء هجومه. إذ إن حقيقة تكتكات الساعة بمعدلات مختلفة اعتماداً على مجال الجاذبية الأرضية هى من الأوجه المهمة للنسبية العامة. وهنا استخدم بوهر معالجة ماهرة فى تطبيق النظرية النسبية للبرهنة على مبدأ عدم التحدد فى ميكانيكا الكم.

إلا أن الخلاف ظل يتصاعد. فما زال أينشتين، ثعلب الفيزياء الماكر، يطرح المزيد من المجادلات الأكثر مهارة ساعيا إلى الإطاحة بنظرية كان يرى أن أسسها الأولية معتلة. وبصفته أحد واضعي أسسها، فقد كان يعرفها أكثر من أى شخص آخر، لذلك عرف كيف يوجه لكماته. وكلما كان أينشتين يوجه ضرباته، كان القلق والاستياء يستبدان ببوهر، وباهتياج شديد يبحث عن إجابة حتى يجدها. ربما كان يردد كلمة لنفسه مرارا وهو ذاهل فى التفكير. فقد قال عنه زملاؤه الفيزيائيون أنه كان يُرى واقفا فى حجرته، يتمتم: "أينشتين ... أينشتين ..."، ويمشى إلى النافذة، متطلعا إلى الخارج، غارقا فى التفكير.. مواصلا: "أينشتين .. أينشتين...".

- وحضر أينشتين مؤتمر سولفاى لعام ١٩٣٣، واستمع إلى كلمة بوهر عن ميكانيكا الكم. وتابع معالجته باهتمام، لكنه لم يقدم أى تعليق عليها. وحين بدأت المناقشات، قادها فى اتجاه يبحث عن معنى ميكانيكا الكم. وحسب وصف روزنفيلد فإن أينشتين "مازال يشعر بعدم الارتياح نفسه كما فى السابق (استخدم كلمة "Enbehagen"، حين ووجه بالنتائج الغريبة للنظرية)[٢٢]. وفى هذه المناسبة بالتحديد طرح لأول مرة ما عرف بعد ذلك بأمضى أسلحته وأشدها فتكا لنظرية الكم. "ماذا تقول فى الموقف التالى؟" توجه بالسؤال إلى روزنفيلد .. "افترض أن جسيمين يتحركان فى اتجاهين متقابلين، ولكل منهما كمية الحركة، الكبيرة جدا، نفسها، ولزمن بالغ الضآلة تفاعلا مع بعضهما البعض عند مرورهما بمواضع معلومة. ونفرض فى ذلك الحين أن ملاحظا بإمكانه احتجاز أحد الجسيمين بعيداً عن منطقة التفاعل، وقام بتقدير كمية حركته، إذن، طبقا لشروط التجربة، يكون قادراً بوضوح على حساب كمية حركة الجسيم الآخر. ومع ذلك، إذا اختار أن يحسب موضع الجسيم الأول، يصبح بمقدوره أن يحدد موضع الجسيم الثانى. وبالتأكيد فإن هذا استنتاج صحيح ومباشر من أسس ميكانيكا الكم، لكن أليس ذلك بالغ التناقض؟ كيف تتأثر الحالة النهائية للجسيم الثانى بسبب القياسات التى أجريت على الجسيم الأول، بعد أن توقفت جميع التفاعلات الفيزيائية بينهما؟".

واستوجب الأمر ها هنا مرور عامين قبل أن يُطلَق العنان أمام المجتمع العلمى لفكرة أينشتين المقنعة على نحو هائل حول نظرية الكم، التى استخدم فيها التناقضات

الواضحة للنظرية لإثبات عدم صحتها. ولم يكن روزنفيلد - الذى شاركه أينشتين تفكيره أثناء الاستماع إلى كلمة بوهر، يعتقد أن أينشتين يقصد بهذه التجربة الفكرية أكثر من مجرد تقديم شرح لأحد الملامح غير المألوفة لنظرية الكم. لكن شرارة فكرة أينشتين التي صاغها للمرة الأولى خلال محاضرة بوهر كان لها أن تتواصل وتترعرع لتأخذ شكلها النهائى بعد عامين.

وبمجرد أن اعتلى هتلر قمة السلطة، غادر ألبرت أينشتين ألمانيا. وفى عام ١٩٣٠، كان أينشتين قد أمضى أوقاتا كثيرة خارج البلاد: إذ كان فى كالتك بكاليفورنيا، وبعدها فى جامعة أوكسفورد. وفي عام ١٩٣٣، وافق أينشتين على تولى العمل فى معهد الدراسات المتطورة المنشأ حديثًا فى برنستون Institute For Advanced Study . وخطَّط أن يقضى جزءًا من وقته هناك، والبعض الآخر فى برلين، لكنه بعد انتصار هتلر، ألغى جميع ارتباطاته فى ألمانيا وأقسم على عدم العودة على الإطلاق. وكان يمضى بعض الوقت فى بلجيكا وإنجلترا، ثم غادر نهائيًا إلى برنستون فى أكتوبر ١٩٣٣ .

واستقر أينشتين فى عمله الجديد بمعهد الدراسات المتطورة. وخصصوا له مساعدا، وهو فيزيائى أمريكى يبلغ من العمر ٢٤ عامًا يسمى ناثان روسين (١٩١٠-١٩٩٥) Nathan Rosen . وعادت علاقته بفيزيائى بالمعهد كان قد تعرف عليه فى كالتك قبل ثلاث سنوات هو بوريس بودولسكى. كان على أينشتين أن يقطع المحيط الأطلسى، على بعد آلاف الأميال من أوروبا التى ولدت فيها نظرية الكم وتطورت، إلا أن النظرية غير المألوفة بمنطقها الغامض وفروضها ظلت تسيطر على عقله.

وكان من عادة أينشتين أن يعمل بمفرده، ومن النادر أن يشاركه أحد فى تأليف أوراقه. لكن فى عام ١٩٣٤، ذكر أن بودولسكى وروسين ساعداه فى كتابة آخر انتقاداته لنظرية الكم[٢٢]. وشرح أينشتين فيما بعد كيف كُتبت الورقة المشهورة حاليا باسم ورقة أينشتين، بودولسكى، وروسين (EPR) ، فى رسالة موجهة إلى إيروين شرودنجر فى العام التالى: "لأسباب لغوية، كتب الورقة بودولسكى، بعد مناقشات مطولة. لكن ما كنت أريد حقيقة أن أقوله لم يتضح جيدا؛ وبدلا من ذلك، فالشىء الأساسى،

كان وكأنه، قد انطمر ولم يُعرف بعد". ورغم انطباع أينشتين الذى يفيد العكس، فإن رسالة المقال الثلاثى EPR الذى استخدم فيه مع زميليه مفهوم التعالق للتشكيك فى مدى اكتمال نظرية الكم، قد ذاع صيتها بوضوح فى كل أنحاء العالم. ففى زيوريخ، استشاط وولفجانج باولى غضبا (١٩٠٠–١٩٥٨) Wolfgang Pauli ، وهو أحد مؤسسى نظرية الكم ومكتشف "مبدأ الاستبعاد" للإلكترونات الذرية. وكتب رسالة طويلة إلى هايزنبرج، قال فيها: "لقد عبر أينشتين مرة أخرى عن موقفه علنا فى مواجهة ميكانيكا الكم، وذلك فى عدد ١٥ مايو من Physical Review (بالاشتراك مع بودولسكى وروسين – وبالمناسبة هى صحبة لا تتم عن خير). وكما هو معلوم تماماً، ففى كل وقت يحدث فيه ذلك، يكون بمثابة كارثة". كان باولى منزعجا بسبب نشر ورقة EPR فى مجلة أمريكية، وانتابه القلق من أن ينقلب الرأى العام فى أمريكا على نظرية الكم. واقترح باولى على ويرنر هايزنبرج – الذى كان مبدأ عدم التحدد الذى اكتشفه هو التكئة لهجوم ورقة EPR – أن يقوم برد سريع.

لكن من كوبنهاجن، جاء الرد الأكثر وضوحا، فقد بدا على نيلز بوهر أنه تلقى ضربة صاعقة. كان مصدوما، ومضطرباً، والغضب يسيطر عليه. وانسحب عائداً إلى منزله. واستنادا إلى ما قاله Pais ، كان روزنفيلد فى زيارة لكوبنهاجن فى ذلك الحين، وقال إنه فى صباح اليوم التالى، ظهر بوهر بمكتبه مبتسما طوال الوقت. واستدار إلى روزنفيلد قائلاً: "بودولسكى، أوبودولسكى، يوبودولسكى، سيوبودولسكى، أسيوبودولسكى، باسيوبودولسكى،..". وأوضح للفيزيائى المندهش أنه كان يتناغم مع بيت من الشعر فى مسرحية هولبرج Ulysses von Ithaca (الفصل الأول، مشهد ١٥)، وفيه يتكلم أحد الخدم فجأة كلاما غامضاً[٢٤].

وذكر روزنفيلد أن بوهر هجر كل المشاريع التى كان يعمل فيها منذ نشر ورقة EPR، وكان يشعر أنه قد بات من الضرورى إزالة سوء الفهم بأسرع ما يمكن. واقترح بوهر أن يستخدم هو ومساعدوه المثال نفسه الذى استخدمه أينشتين لتبيان الطريق "الصحيح" للتفكير فى المسألة. وبدأ بوهر، مستثاراً، يُملى على روزنفيلد الرد على أينشتين.. لكن سرعان ما توقف متردداً" لا، لن يجدى ذلك... يتعين علينا أن نفعل هذا

كله مرة أخرى .. لابد أن نجعله تام الوضوح..." وكما يقول روزنفيلد استمر الحال على ما هو عليه لبعض الوقت. ومن آن إلى آخر، يستدير بوهر إلى روزنفيلد: "ماذا يقصدون؟ هل فهمت ذلك؟" كان يدير الأفكار فى رأسه، ولا يستقر له قرار. فى آخر المطاف، قال إنه "لا بد أن يؤجلها لليوم التالى"(٢٥).

وبعد عدة أسابيع تالية، غدا بوهر هادئًا إلى حد أتاح له كتابة رده الدامغ على ورقة أينشتين - بودولسكى - روسين. وبعد ثلاثة أشهر من العمل الشاق، أرسل بوهر رده على أينشتين وزميليه إلى المجلة نفسها التى نشرت ورقة EPR ، Physical Review . وجاء فى جزء من رده "نحن مع حرية الاختيار التى تقدمها ورقة (EPR) ، وما يهمنا فحسب هو التمييز بين إجراءات تجريبية مختلفة تتيح عدم الالتباس فى استخدام المفاهيم الكلاسيكية التكميلية".

إلا أن الفيزيائيين لم ينظروا جميعا إلى الوضع على هذا النحو، فإن إيروين شرودنجر، الذى عارضت ورقة EPR نظريته، قال لأينشتين: "إنك قبضت بإحكام على ميكانيكا الكم الدوجماتية من حلقها على رءوس الأشهاد". أما أغلب العلماء فانقسموا ما بين مقتنع برد بوهر على ورقة EPR ، أو من اعتقدوا أن الاعتراض كان فلسفيا أكثر منه فيزيائيا، نظراً لأن النتائج التجريبية كانت فوق كل شك. وبالتالى كانت خارج اهتمامهم. وبعد ثلاثة عقود سوف تقوض فرضية جون بل وجهة النظر هذه.

ماذا تقول الورقة الثلاثية EPR ؟

بحسب أينشتين، وبودولسكى، وروسين، فإن أى خاصية لنظام فيزيائى يمكن التنبؤ بها بدقة دون التسبب فى اضطراب النظام هى عنصر من عناصر الواقع الفيزيائى.

أكثر من هذا، تطرح ورقة EPR أن أى وصف كامل للنظام الفيزيائى تحت الدراسة ينبغى أن يشمل جميع عناصر الواقع الفيزيائى المصاحبة للنظام.

والآن فإن المثال الذى عرضه أينشتين (وهو بصورة أساسية المثال نفسه الذى ذكره لروزنفيلد قبل عامين) عن الجسيمين المرتبطين معا، يوضح أنه يمكن الحصول

على موضع وكمية حركة جسيم معين من خلال حساب القياسات المناسبة لجسيم آخر دون التسبب فى اضطراب لـ "توأمه". وبالتالى فإن خصائص الجسيمين التوأمين هى عناصر من الواقع الفيزيائى. ونظرا لأن ميكانيكا الكم لا تسمح لهما معا بالدخول فى توصيف الجسيم، لذا فإن النظرية غير كاملة.

وتعتبر ورقة EPR (علاوة على فرضية جون بل، التى جاءت تالية لها) من أهم الأوراق فى العلوم خلال القرن العشرين، إذ تقول: "إذا استطعنا دون التسبب فى اضطراب أى نظام بأى شكل من الأشكال، التنبؤ بدقة (بمعنى أن الاحتمال يساوى الواحد الصحيح) بمقدار أى كمية فيزيائية، إذن فإنه يوجد عنصر من الواقع الفيزيائى ينطبق على هذه الكمية الفيزيائية. ويبدو لنا أن هذا المعيار، دون استنفاد كل الوسائل الممكنة فى التعرف على واقع فيزيائى، يزودنا على الأقل بوسيلة واحدة منها، طالما تتوفر لها فئة الشروط اللازمة لحدوثها"(٢٦).

لذلك، فإن ورقة EPR تعتمد على تقديم وصف لحالات متعالقة. وهذه الحالات المتعالقة تتميز بالتعقيد، ذلك لأنها تستخدم كلا من موضع وكمية حركة جسيمين كانا قد تفاعلا فى الماضى وبالتالى فهما مترابطان. واعتمد طرحهم في الورقة أساسا على تقديم وصف للتعالق الكمى للموضع وكمية الحركة. وبعد تقديم هذا الوصف، تصل الورقة إلى الاستنتاج :

"وهكذا، بقياس إما A أو B نكون فى وضع يسمح بالتنبؤ بدقة، وبدون التسبب فى اضطراب النظام الثانى بأى شكل كان، إما بقيمة الكمية P أو قيمة الكمية Q . وطبقًا لمعيارنا عن الواقع، فى الحالة الأولى ينبغى أن نضع فى الاعتبار الكمية P نجد أنها عنصر من عناصر الواقع، وفى الحالة الثانية تكون الكمية Q هى أيضا عنصر من الواقع. لكن كما رأينا، تنتمى الدالتان الموجيتان إلى الواقع نفسه. وأثبتنا من قبل أنه إما: (١) أن وصف الميكانيكا الكمية للواقع المعطى بالدالة الموجية ليس كاملاً. أو (٢) عندما يكون المؤثران المطابقان للكميتين الفيزيائيتين غير قابلين للإبدال؛

إذن لا يمكن أن يكون للكميتين الفيزيائيتين وجود واقعى متزامن ...، ولذلك فنحن مضطرون إلى استنتاج أن الوصف الذى تقدمه ميكانيكا الكم للواقع الفيزيائى المعطى بالدالة الموجية ليس وصفًا كاملا".

وكان وكأن ما فعله أينشتين وزميلاه يبدو أنه فرض بالغ المعقولية، وهو فرض الموضع. فما يحدث فى مكان معين لا يؤثر على الفور فيما يحدث فى مكان آخر. وتقول ورقة EPR : "إذا استطعنا – بدون أن نتسبب فى اضطراب نظام بأى شكل كان – التنبؤ بدقة (أى أن الاحتمال يساوى الواحد الصحيح) بمقدار أى كمية فيزيائية، إذن فإنه يوجد عنصر من الواقع الفيزيائى مطابق لهذه الكمية الفيزيائية". ويتحقق هذا الشرط عندما يتم قياس موضع الجسيم الأول، وكذلك عندما يتم قياس كمية الحركة للجسيم نفسه. وفى الحالتين يمكننا التنبؤ بدقة بموضع (أو كمية حركة) الجسيم الآخر. ويتيح هذا الاستدلال وجود عنصر من الواقع الفيزيائى. والآن، نظرًا لأن الجسيم الثانى لم يتأثر (حسب فرضهم) بما حدث للجسيم الأول، وعنصر الواقع – الموضع – لهذا الجسيم تم الاستدلال عليه فى حالة واحدة، وكمية الحركة فى الحالة الأخرى، وكل من الموضع وكمية الحركة هما من عناصر الواقع الفيزيائى للجسيم الثانى. وبالتالى فهذا "تناقض" حسب ورقة EPR . نحن لدينا جسيمان يرتبطان أحدهما بالآخر. ونجرى قياسات على الأول ولدينا معرفة بالآخر. ولذلك، فإن النظرية التى تتيح لنا فعل ذلك نظرية غير كاملة.

وفى رده، قال بوهر: "إلا أن اتجاه الجدال فى ورقتهم (EPR) ، مع ذلك، لا يبدو لى ملائما إزاء الوضع الفعلى الذى يواجهنا فى الفيزياء الذرية". وقال إن "التناقض" الذى تقول به ورقة EPR لم يقدم تحديا عمليًا فى تطبيق نظرية الكم على قضايا الفيزياء الحقيقية. ويبدا أن معظم الفيزيائيين قد تقبلوا حججه.

وعاد أينشتين مجددًا إلى المسألة التى عرضتها ورقة EPR فى مقالات كتبها عامى ١٩٤٨ ، ١٩٤٩، بيد أنه أمضى معظم الوقت المتبقى حتى وفاته فى عام ١٩٥٥، وهو يحاول – دون نجاح – تطوير نظرية موحَّدة فى الفيزياء. ولم يحدث على الإطلاق أن

توصل إلى تصديق أن الله يلعب النرد - وظل على اعتقاده بأن نظرية الكم بما تنطوى عليه من خاصية احتمالية لا يمكن أن تكون كاملة. وكان يعتقد أن ثمة شيئًا غائبًا عن النظرية، ربما بعض متغيرات خافية قد تفسر عناصر الواقع على نحو أفضل. وبقيت المشكلة المحيرة: جسيمان مرتبطان أحدهما بالآخر - توأمان نتجا عن العملية نفسها - يستمران إلى الأبد مرتبطين. والدالة الموجية لهما غير قابلة للتحليل إلى مُرَكَّبتين منفصلتين. أيا كان ما يحدث لجسيم منهما لابد وأن يؤثر على الفور فى الجسيم الآخر، أيا كان موضعه فى الكون. وأطلق أينشتين على ذلك اسم "فعل للأشباح من بعيد".

ولم ينس بوهر أبدا مجادلاته مع أينشتين. وظل يتحدث عنها حتى يوم وفاته عام ١٩٦٢ . وخاض بوهر حربا ضروسا كى تجد نظرية الكم قبولاً من عالم العلم. وصد كل هجوم على النظرية، كما لو كان هجوما على شخصه. واعتقد معظم الفيزيائيين أن بوهر قد توصل أخيراً إلى تسوية قضية نظرية الكم وورقة EPR، إلا أنه بعد عقدين دبت الحياة فى مجادلة أينشتين من جديد وتم تحسينها لكن، هذه المرة، على يد فيزيائى آخر.


محمد خطاب

الفصل الثانى عشر

بوهم وأهارونوف

"أكثر النظريات القائمة على أساس والمتاحة الآن هى نظريات احتمالية من ناحية الشكل، وليست يقينية".

دافيد بوهم

ولد دافيد بوهم David Bohm فى عام ١٩١٧، ودرس بجامعة بنسلفانيا، ثم بجامعة كاليفورنيا فى بيركلى. وكان أحد تلاميذ روبرت أوبنهايمر Robert Oppenheimer حتى رحل أوبنهايمر عن بيركلى ليرأس مشروع مانهاتن(*). وأكمل بوهم دراسته للدكتوراه فى بيركلى ومن ثم وافق على أن يتولى منصبا فى جامعة برنستون.

وفى برنستون عمل فى فلسفة ميكانيكا الكم، وفى عام ١٩٥٢ تمكّن من تحقيق اختراق فى فهمنا لمسألة الورقة الثلاثية EPR . إذ قام بوهم بإجراء تغيير فى إطار معارضة أينشتين لنظرية الكم - أى فى ورقة EPR - على نحو جعل القضايا المتضمّنة فى "التناقض" أكثر وضوحًا، وأكثر دقة، وأسهل فى الفهم. بدلاً من استخدام كمية الحركة والموضع - عنصران - فى تحضيرات تجربة EPR ، غيّر بوهم التجربة الفكرية إلى تجربة تضم جسيمين بمتغير واحد موضع الملاحظة بدلاً من متغيرين، وجعل

(*) مشروع مانهاتن : مشروع صنع أول قنبلة ذرية. (المراجع)

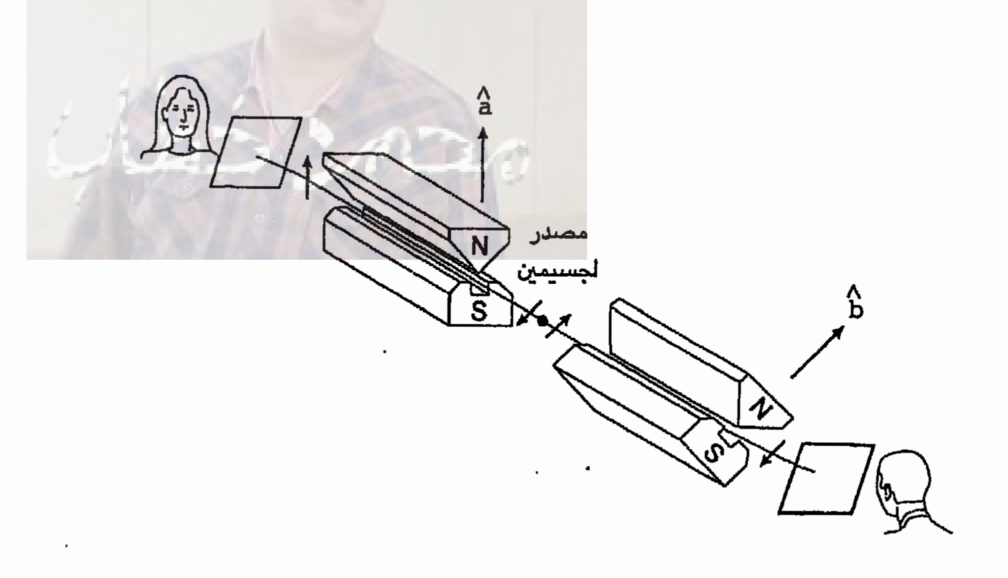
العنصر الفيزيائى موضع الملاحظة هو الحركة الدورانية المصاحبة لكل جسيم منهما فى اتجاه معين. وفى صيغة بوهم، كما فى ترتيبات EPR الأصلية، يمكن وضع جسيمين تفصل بينهما مسافة، بحيث تكون قياسات الحركة الدورانية لكل منهما منفصلة فى المكان والزمان، بدون تأثير مباشر من أحدهما فى الآخر.

يذكر أن لبعض الجسيمات، مثل الإلكترونات، حركة دورانية(*) مصاحبة لها. ويمكن حساب الحركة الدورانية بشكل مستقل فى أى اتجاه نختاره. وباختيار محور معين axis ، نتحصل على إجابة من اثنتين: "دوران لأعلى" أو "دوران لأسفل" عند حساب أى حركة دورانية.. وعندما يتعالق جسيمان معًا فيما يسمى الحالة الأدنى Singlet State – وفيها مجموع الدورانات لابد أن تساوى الصفر، يصير بالإمكان أن يرتبط دورانهما ارتباطا لا ينفصم: فإذا كان دوران أحدهما لأعلى، سيكون دوران الآخر لأسفل. غير أننا لا نعرف نوعية الدوران، وطبقًا لنظرية الكم فإن الحركة الدورانية ليست خاصية محددة إلى أن نتمكن من قياسها (أو التحقق من حدوثها فعليا). وفى التجربة ينطلق جسيمان من مصدر واحد على نحو يجعلهما يتعالقان، ويتحركان بعيدا عن بعضهما. وبعد زمن معين قامت (أليس Alice) بقياس الجسيم A ، واختارت أن تقيس الحركة الدورانية للجسيم، مثلا، فى اتجاه المحور x .وطبقًا لنظرية الكم: إذا تحرك الجسيم "A" حركة دورانية "لأعلى" فى الاتجاه x يقيس (بوب – Bob) الجسيم B فى اتجاه المحور x حركة دورانية "لأسفل". ويحدث هذا الارتباط المتعاكس نفسه إذا اختار أليس وبوب الحركة الدورانية فى أى اتجاه آخر – مثلا اتجاه المحور y . (وسوف نحتاج إلى اختيار الاتجاهين لكى نجرى مجادلة الورقة EPR باستخدام الحركة الدورانية).

وفى تعديل بوهم للتجربة الفكرية فى الورقة EPR ، ينبعث جسيمان متعالقان. بمجرد قياس الحركة الدورانية لأحدهما، ووجدنا أنها "حركة لأعلى"، فلابد أن تكون الحركة الدورانية للجسيم الثانى "حركة لأسفل"، ويتحقق هذا الشرط لجميع الاتجاهات، مثلا للاتجاهين x ، y – وطبقًا لنظرية الكم: فإن قيم الحركة الدورانية فى الاتجاهات

(*) spin motion حركة لف، برم، أو حركة دورانية مثل لعبة النحلة. (المراجع)

المختلفة ليس لها واقع متزامن. لكن تنص ورقة EPR على أنها جميعا وقائع حقيقية. ويفضى تعديل بوهم فى التجربة الفكرية لورقة EPR إلى تبسيط التحليل إلى حد كبير. والشكل التالى يوضح تعديل بوهم للتجربة الفكرية EPR .

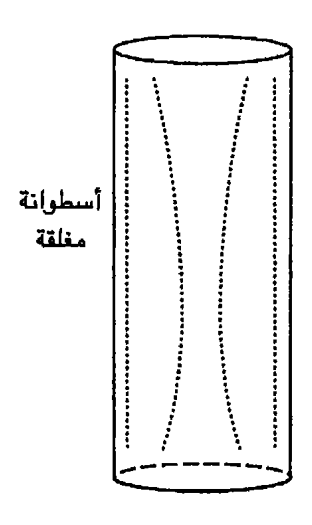


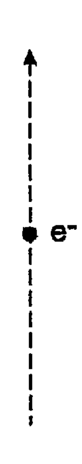
وفى عام ١٩٤٩، خضع بوهم للتحقيق على يد لجنة تشريعية House Committee متهما بممارسة أنشطة معادية لأمريكا، فى أوج الفترة المكارثية. ورفض بوهم الرد على أى أسئلة، ولم يثبت عليه أى اتهام. ومع ذلك، خسر عمله فى جامعة برنستون، ونتيجة لذلك غادر الولايات المتحدة ليحتل منصبا فى ساو باولو بالبرازيل. ومن هناك انتقل لفترة إلى إسرائيل، ثم إلى إنجلترا، وهناك أصبح أستاذا فى الفيزياء النظرية بجامعة لندن. واستمر بوهم يعمل فى أسس نظرية الكم، وأدت اكتشافاته إلى تعديل فى وجهة نظر كوبنهاجن "التقليدية" فى قواعد العمل.

وفى عام ١٩٥٧، قام بوهم مع ياكير أهارونوف من تخنيون Technion فى حيفا بإسرائيل بكتابة ورقة تعيد إلى الحياة تجربة وو Wu وشاكنوف وتشرحها، وهى التى

تعرض علاقات ارتباط الحركة الدورانية فى نسخة بوهم لتعديل التناقض فى EPR . وجاءت حجج الورقة مناقضة لوجهة النظر القائلة بأنه ربما كان الجسيمان غير متعالقين فى الواقع، أو أن التعالق الكمى للجسيمات قد يتبدد Dissipate مع ازدياد المسافة بينهما. غير أن كل التجارب التى أجريت منذ ذلك الحين تؤيد وجهة النظر القائلة بأن: التعالق بين الجسيمات حقيقة واقعة ولا يتبدد بازدياد المسافة التى تفصل بينهما.

وفى عام ١٩٥٩، اكتشف بوهم وأهارونوف، ما يسمى الآن بتأثير أهارونوف - بوهم، وهو الاكتشاف الذى كان سببا فى شهرتهما. وتأثير أهارونوف - بوهم ظاهرة غامضة، شأنه شأن التعالق، ذلك أن له خاصية غير موضعية، فقد اكتشف الباحثان أن ثمة إزاحة فى الطور فى تداخل الإلكترون ناجمة عن مجال كهرومغناطيسى شدة مجاله تساوى الصفر على طول مسار الإلكترون. ويعنى ذلك أنه حتى لو كان لدينا أسطوانة يوجد بداخلها مجال كهرومغناطيسى، لكن المجال يقتصر على الأسطوانة من الداخل فحسب، فإنه إذا مر إلكترون خارج الأسطوانة فإنه سيستمر فى الشعور بتأثيرات المجال الكهرومغناطيسى. وبالتالى، فإن الإلكترون الذى يمر خارج الأسطوانة التى تحتوى على المجال المغناطيسى سيواصل - على نحو غامض - التأثر بالمجال الموجود داخل الأسطوانة. ويتضح هذا من الشكل التالى :





وشأن الألغاز الغامضة الأخرى لميكانيكا الكم، لا يفهم أحد حقيقة "لماذا" يحدث هذا. وهذا التأثير يشبه ظاهرة التعالق على خلفية أنه ليس موضعيا. وقد توصل بوهم وأهارونوف إلى هذا التأثير من خلال الحسابات النظرية والرياضية. وبعد عدة سنوات، ثبتت صحة تأثير أهارونوف – بوهم تجريبيا.

على أن إسهامات بوهم فى فهمنا لنظرية الكم وظاهرة التعالق لها أهميتها. إذ إن تعديله للتجربة الفكرية EPR ، يعد أحد أهم الأبحاث التى ظل يستخدمها دائما التجريبيون والنظريون الذين يدرسون التعالق فى العقود التالية.

وعلاوة على ذلك، فإن أحد الشروط المهمة فى تجارب تناقض EPR وضع خططها التفصيلية بوهم وأهارونوف فى عام ١٩٥٧ ، فقد ذكرا أنه لاكتشاف ما إذا كان الجسيمان فى ورقة EPR يتصرفان على النحو الذى وجد أينشتين وزميلاه أنه متناقض، يتعين علينا استخدام آلية الخيار – المؤجل. بمعنى، أنه يتعين علينا أن نختار اتجاها معينا للحركة الدورانية التى نريد قياسها فى التجربة فقط بعد انطلاق الجسيمين. ومن خلال هذا الإجراء يمكننا التأكد من أن الجسيم الأول، أو جهاز التجربة، لم يرسل إشارة إلى الجسيم الآخر بما يحدث. وقد أكد هذا الشرط جون بل، الذى سوف تغير فرضيته إدراكنا للواقع. وسوف يقوم عالم تجريبى مهم بإضافة هذه الشروط فى تجاربه على فرضية جون بل، الأمر الذى يساعد على وضع أسس حقيقة أن تعالق الجسيمات التى تبعد عن بعضها هى ظاهرة فيزيائية حقيقية.

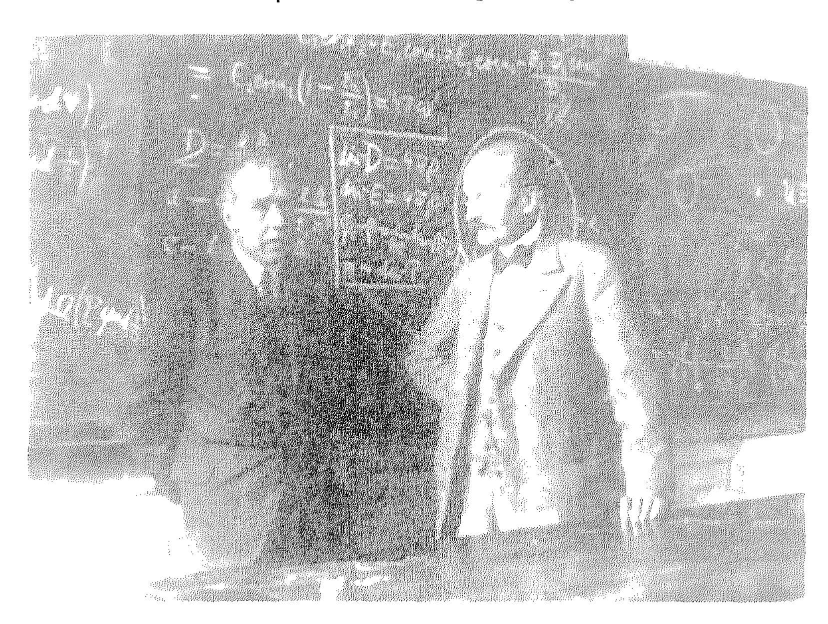


نيلز بوهر وألبرت أنيشتين
فى مؤتمر سولفاى عام ١٩٣٠



نيلز بوهر وويرنر هايزنبرج
فى تيرول عام ١٩٣٢

هايزنبرج وبوهر في مؤتمر كوبنهاجن عام ١٩٣٦



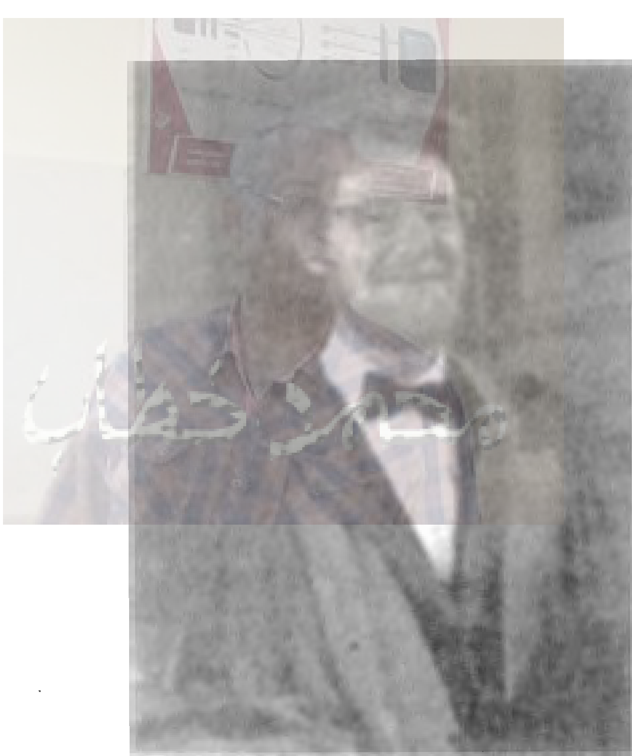
نيلز بوهر مع ماكس بلانك في كوبنهاجن عام ١٩٣٠



ماكس بلانك فى عام ١٩٢١



إيروين شرودنجر



جـون بـل



من اليمين إلى اليسار : جرينبرجر ، هورن ، زايلنجر أمام تصميم تجربة **GHZ**
فى معمل أنطون زايلنجر فى فيينا

أرافينـد



آلان أسبكت فى مكتبه فى أورساى ، فرنسا

كارول ومايكل هورن ، أنطون وإليزابيث زايلنجر ، فى كامبردج عام ٢٠٠١



أبنر شيمونى



إلى اليمين : چون أرشيبالد هويلر ، مع المؤلف على سطح منزل هويلر فى Maine


محمد خطاب

الفصل الثالث عشر

فرضية جون بل

"وإذن، فإنه بالنسبة إلى، هذه هى المشكلة الحقيقية مع نظرية الكم: التعارض الأساسى الواضح بين أى معادلة صارمة والنسبية الأصلية. وربما كان إجراء تركيب حقيقى بين نظريتى الكم والنسبية لا يتطلب مجرد تطورات تقنية، بل تجديداً جذرياً فى المفاهيم".

جون بل

كان جون بل John Bell رجلا أحمر الشعر يكسو النمش وجهه، ويتميز بالهدوء والأدب، والانطوائية، ولد فى بلفاست، بأيرلندا الشمالية فى عام ١٩٢٨ لعائلة من الطبقة العاملة يعمل أفرادها فى الحدادة والزراعة. وكان أبواه جون وآنى بل ، من عائلتين استوطنتا أيرلندا الشمالية لأجيال. أما الاسم الأوسط لجون، وهو ستيورات، فكان لقب العائلة الأسكتلندية لأمه، وفى المنزل كان يطلق عليه اسم ستيورات وظل هكذا حتى ذهب إلى الكلية. وكانت عائلته إنجيليكية (وهم أعضاء الكنيسة الأيرلندية)، لكن جون طور صداقات تتجاوز الدين أو العرق، وكان الكثير من أصدقائه أعضاء فى الطائفة الكاثوليكية. ولم يكن أبواه ثريين، لكنهما كانا يهتمان بالتعليم، وبذلا أقصى جهدهما لتوفير النفقات اللازمة لإرسال جون إلى المدرسة، على الرغم من أن أخويه تركا

الدراسة مبكرا واتجها للعمل. وفى النهاية تمكن أخواه من تعليم نفسيهما، وأصبح أحدهما أستاذًا، والآخر رجل أعمال ناجحًا.

وحين بلغ الحادية عشرة من عمره، قرر جون – صاحب القراءات متعددة المجالات – أنه يريد أن يصبح عالمًا. وحقق نجاحًا باهر فى امتحانات القبول بالمرحلة الثانوية، لكن لسوء الحظ لم تكن القدرات المالية لأسرته تتحمل أن ترسله إلى مدرسة ذات طابع علمى، واضطر جون أن يقتنع بالالتحاق بمدرسة بلفاست الثانوية للتكنولوجيا حيث درس بعض المواد النظرية والعملية. وتخرج منها عام ١٩٤٤ فى سن السادسة عشرة ووجد وظيفة كمساعد فنى فى قسم الفيزياء بجامعة كوين ببلفاست. وهناك عمل تحت إشراف البروفيسير كارل إميليوس Karl Emeleus ، الذى تعرف على موهبة مساعده الجلية فى العلوم فأعاره الكتب، بل وسمح له بحضور مقررات الطلبة الجدد بدون أن يكون ملتحقًا بالجامعة رسميًا.

وبعد عام من عمله كفنى تم قبول جون بالجامعة طالبًا بها ونال منحة متواضعة، سهلت له مسعاه للحصول على درجة فى الفيزياء، وتخرج عام ١٩٤٨ وقد نال شهادة فى الفيزياء التجريبية، ولبث عاما آخر نال فى نهايته درجة أخرى فى البكالوريوس، وهذه المرة فى الفيزياء الرياضية. وكان من حسن حظ جون أن يتلقى دروسه على يد الفيزيائى بول إوالد Paul Ewald ، وهو مهاجر ألمانى موهوب، كان رائدا فى مجال علم بلورات الأشعة السينية. وتميّز جون فى الفيزياء، إلا أنه كان مستاء من الطريقة التى يتم بها شرح نظرية الكم فى الجامعة. وترسخ فى ذهنه بعمق أنه لابدَ أن ثمة بعض الأمور الغامضة فى هذه النظرية لم يتم تناولها فى حجرة الدراسة. ولم يكن يدرى، فى ذلك الوقت، أن هذه الأفكار غير المشروحة لم يفهمها أى شخص آخر على الإطلاق، كما أن هذا سوف يكون بحثه الخاص حين يأتى وقت يلقى فيه الضوء على هذه القضايا.

وعقب فترة من اشتغاله فى معمل للفيزياء فى كلية كوين ببلفاست، التحق جون بجامعة برمنجهام Birmingham، حيث حصل على شهادته فى الدكتوراه للفيزياء عام ١٩٥٦ .

وتخصص فى الفيزياء النووية ونظرية المجال الكمى، وبعد نيله للشهادة عمل لعدة سنوات فى هيئة الطاقة الذرية البريطانية.

وأثناء العمل فى فيزياء المسرِّعات (المعجلات) Accelerator physics فى مالفرن ببريطانيا، التقى جون مع مارى روس Mary Ross ، زميلة له فى نفس التخصص، وتزوجا عام ١٩٥٤، وواصلا حياتهما المهنية معا، يعملان معظم الوقت فى المشروعات نفسها. وبعد إحرازهما للدكتوراه (نالتها فى الفيزياء الرياضية من جامعة جلاسجو Glasgow)، وعملا عدة سنوات فى هارويل Harwell بهيئة الطاقة النووية البريطانية، تحرر الاثنان من وهم التوجهات التى يتبناها المركز النووى للبحوث، واستقالا من الوظيفة الثابتة فى هارويل ليتوليا وظائف غير ثابتة فى المركز الأوروبى للبحوث النووية فى جنيف - European Center for Nuclear Research (CERN) . وهناك اشتغل جون فى القسم النظرى Theory Division بينما كانت مارى عضوا فى مجموعة بحوث المسرِّعات.

وكل من كان يعرف جون بل أذهلته براعته، وأمانته العلمية، وتواضعه الجم. وأصدر كثيراً من الأوراق العلمية والكثير من المذكرات المهمة، وكان واضحًا لكل من يعرفه أنه واحد من أعظم العقول فى ذلك العهد. وتوزعت أعمال جون على ثلاثة مجالات مهنية: الأول: دراسة معجلات الجسيم التى عمل بها، والثانى: الفيزياء النظرية للجسيم واشتغل بها فى المركز الأوروبى للبحوث النووية، والثالث : الذى أفضى فى النهاية إلى ذيوع اسمه خارج مجتمع الفيزيائيين - وكان فى المفاهيم الأساسية لميكانيكا الكم. وفى المؤتمرات التى انعقدت من حوله، كان يشهدها متخصصون من المجالات الثلاثة التى برع فيها جون، وإن كان كل واحد منهم لا يعلم شيئًا عن المجالين الآخرين. واستطاع جون بل بشكل واضح أن يفصل تمامًا بين هذه التخصصات، حتى إن المتخصص فى واحد منها لم يكن يعلم أنه يشارك فى المجالين الآخرين.

وكانت ساعات عمل جون بل فى المركز الأوروبى للبحوث النووية مكرسة حصريًا على الأغلب للفيزياء النظرية للجسيمات وتصميم المعجلات، حتى إن وقت فراغه بالمنزل كان الوقت الوحيد الذى يجرى فيه بحوثه فيما أسماه "هوايته"، استكشاف العناصر

الأساسية لنظرية الكم. وفى عام ١٩٦٣، أمضى إجازة لمدة عام بعيداً عن المركز الأوروبى للأبحاث النووية قضاه فى ستانفورد Stanford بجامعة ويسكونسن Wisconsin ، وفى جامعة براندیز Brandies . وفى خلال هذا العام خارج البلاد بدأ جون يعالج مسائل فى صميم نظرية الكم على نحو جاد. وواصل عمله فى هذه الموضوعات بعد عودته إلى CERN فى عام ١٩٦٤، إلا أنه كان حريصاً على احتفاظه بالاهتمام بنظرية الكم منفصلا عن عمله المهنى "الأساسى" فى CERN فى إجراء البحوث على الجسيمات والمعجلات، والسبب في ذلك أنه أدرك مبكراً أثناء عمله المهنى الشراك الخطيرة فى ميكانيكا الكم. وخلال إجازة له وهو فى الولايات المتحدة، أنجز جون بل اختراقاً حين اكتشف خطأ لجون فون نيومان فى فروضه حول نظرية الكم، لكن، حسب كلمات بل: "لقد نجوت من هذه المشكلة".

لم يكن الشك ليخامر أى شخص على الإطلاق فى أن جون فون نيومان رياضى بارع - إن لم يكن عبقرياً. ولم يكن لدى جون بل أى مشكلة مع رياضيات فون نيومان. كانت المساحات المشتركة بين الرياضيات والفيزياء هى التى تثير قلقه. وفى كتابه المبدع حول أسس نظرية الكم، طرح فون نيومان أحد الفروض - وإن كان أساسياً لما أعقبه - إلا أنه لم يكن على أساس فيزيائى متين، وفقا لما كان يراه جون بل - فقد افترض فون نيومان فى كتابه عن نظرية الكم أن القيمة المتوقعة (المتوسط الاحتمالى المقدر) لمجموع قيم عدة كميات تحت الملاحظة تساوى مجموع القيم المتوقعة لهذه المقادير كل منها على حدة. [رياضياً .. بفرض المقادير ...A,B,C وكان معامل التوقع ( ) E ، واعتقد فون نيومان أنه من الطبيعى أن يكون ... + E (A+B+C+ ...) = E (A) + E (B) + E (c)
وكان جون بل يعلم أن هذا الفرض غير الخاطئ ظاهريا لا يمكن الدفاع عنه فيزيائيا إذا استبدلنا القيم ...A,B,C ومثلناها بـ (معاملات - مؤثرات Operators) لا يلزم بالضرورة أن تكون صحيحة فى عملية الإبدال Commute . لكن بدون التزام تقريبا بالقواعد الرياضية، تخلى فون مان على نحو ما عن مبدأ عدم التحدد ونتائجه، ذلك لأن المعاملات غير القابلة للإبدال لا يمكن قياسها فى اللحظة نفسها بدون خسائر فى الدقة من منظور مبدأ عدم التحدد.

وكتب جون بل أولى أوراقه المهمة حول أسس الكم، والتى صدرت مع ورقته الثانية فى هذا المجال عام ١٩٦٦ (والثانية، ترتبط بها وسوف نناقشها على الفور، لأنها صدرت أولاً). وكان عنوان هذه الورقة "حول مسألة المتغيرات الخافية فى ميكانيكا الكم" وتناول فيها الخطأ فى عمل فون نيومان فضلا عن صعوبات مماثلة فى أعمال جوش **Jauch** وبيرون **Piron** وأندرو جليسون **Andrew Gleason** .

وكان جليسون قد حاز شهرة فى الرياضيات تماثل شهرة فون نيومان. ويعمل أستاذا فى جامعة هارفارد وقد صنع اسمه من خلال حل إحدى مسائل هيلبرت الشهيرة. وفى ١٩٥٧، كتب أندرو جليسون ورقة حول معاملات الإسقاط فى فضاء هيلبرت. ولم يكن جون بل يعلم أن فرضية جليسون ذات صلة وثيقة بمسألة المتغيرات الخافية فى ميكانيكا الكم. أما جوزيف جوش **Josef Jauch** الذى أقام لفترة فى جنيف، حيث كان يعيش جون ومارى بل، فقد جذب اهتمام جون بل إلى فرضية جليسون أثناء عمله فى إجراء البحوث على ورقته حول المتغيرات الخافية. وكانت فرضية جليسون تتسم بعمومية معينة ولا تهدف إلى حل مسائل فى ميكانيكا الكم، التى تم البرهنة عليها من رياضى مختص فى الرياضة البحتة ومهتم بالرياضيات أكثر من الفيزياء. ومع ذلك، تسفر الفرضية عن عدة تطبيقات تنطوى على مضامين مهمة تتعلق بميكانيكا الكم. ومؤدى نتيجة فرضية جليسون أنه لا يوجد فى ميكانيكا الكم نظام مصاحب لفراغ هيلبرت أكبر من أو يساوى البعد الثالث يسمح بوجود حالة خالية من التشتت (أو عديمة التشتت). ومع هذا لاحظ جون بل أنه إذا أضعفنا معطيات فرضية جليسون، تكون ثمة احتمالية فى نوع أكثر عمومية لنظرية المتغيرات الخافية، وهى فئة من النظريات معروفة اليوم باسم نظريات المتغيرات الخافية "القرينية" **Contextual** . وهكذا كانت هناك ثغرة للهروب **loophole** إذا حاولنا استخدام فرضية جليسون فى إطار فكرة الورقة **EPR** .

وتُعرف الحالات عديمة التشتت **dispersion - free States** بأنها الحالات التى يمكن قياس مقاديرها بدقة. وهذه الحالات ليس بها متغيرات، أو تشتت، أو عدم تحدد. وإذا أمكن للحالات عديمة التشتت أن توجد، فإن الدقة التى تلزمها تأتى من بعض

المتغيرات الخافية، أو الغائبة، ذلك لأن نظرية الكم تبيح وجود مبدأ لعدم التحدد. وهكذا للإفلات من عدم التحدد المتبقى والملازم لميكانيكا الكم من أجل الحصول على هذه الدقة، أى الحالات عديمة التشتت، لابد لنا من استخدام متغيرات خافية.

لم يفهم جون بل برهان جليسون لنتيجة فرضيته، لذلك تقدم ببرهان من صنعه أوضح من خلاله أنه، فيما عدا الحالة غير المهمة لفضاء هيلبرت ذى البعدين، لا توجد حالات عديمة التشتت، وبالتالى لا توجد متغيرات خافية. وفى حالة فون نيومان أثبت جون بل أن الافتراض الذى طرحه فون نيومان ليس ملائما؛ وبالتالى فإن النتائج التى توصل إليها مشكوك فيها. وبإحياء الجدال عما إذا كان للمتغيرات الخافية وجود فى ميكانيكا الكم، مضى جون بل خطوة أبعد: إذ شن هجومًا عل مسألة ورقة EPR وظاهرة التعالق.

عكف جون بل على قراءة ورقة ١٩٣٥ التى كتبها أينشتين وزميلاه بودولسكى وروسين (EPR) ، التى صدرت قبل ٣٠ عامًا فى معارضة لنظرية الكم. وقد رد بوهر وآخرون على الورقة، واعتقد كل من يعمل فى مجال الفيزياء أن الموضوع قد وصل إلى منتهاه، واتضح أن أينشتين كان مخطئًا، لكن جون بل كان له رأى آخر.

أدرك جون بل حقيقة هائلة تتعلق بجدال EPR القديم: كان يعلم أن أينشتين وزميليه على صواب بالتأكيد. إذ إن "تناقض EPR" حسب التسمية التى أطلقها عليها الجميع، لم يكن تناقضًا على الإطلاق، فإن ما اكتشفه أينشتين وزميلاه كان أمرا حاسما بعض الشىء فى طريقة فهمنا لآليات عمل الكون، لكنه لم يكن بالزعم الذى يؤكد أن نظرية الكم نظرية غير كاملة . المشكلة أن ميكانيكا الكم وإصرار أينشتين على الواقعية والموضع لن يكون كلاهما على صواب. فإذا كانت ميكانيكا الكم صحيحة، لن يكون الموضع كذلك، وإذا أصررنا على الموضع، إذن لابد أن ثمة خطأ ما فى ميكانيكا الكم فى وصفها لعالم الجسيمات الدقيقة. وكتب جون بل هذا الاستنتاج فى صورة فرضية رياضية عميقة، احتوت على بعض المتباينات Inequalities . واقترح أنه إذا تعارضت هذه المتباينات مع نتائج الاختبارات التجريبية. لأسفر هذا التعارض عن

توفر دليل لصالح ميكانيكا الكم، وفى مواجهة فرض أينشتين عن واقعية الموضع. أما إذا ثبت صحة هذه المتباينات، فيمكن، بالتالى، البرهنة على أن نظرية الكم كانت خاطئة، وأن الموضع – وفقًا لرأى أينشتين – كان هو وجهة النظر الصحيحة. وبدقة أكثر، من الممكن إثبات عدم صحة كل من متباينات جون بل وتنبؤات ميكانيكا الكم، لكن من المستحيل الرضوخ لكل من متباينات جون بل وتنبؤات ميكانيكا الكم لحالات كمية معينة.

وكتب جون بل ورقتين مبدعتين؛ فى الأولى حلل فكرة فون نيومان وآخرين حول وجود متغيرات خافية، يتعين إيجادها وإضافتها إلى نظرية الكم من أجل أن تغدو "كاملة"، حسب مطالبة أينشتين وزميليه. وأثبت جون بل فى هذه الورقة أن برهان فون نيومان وآخرين باستحالة وجود عناصر خافية فى ميكانيكا الكم هراء بأكمله. ثم قدم جون بل برهان فرضيته الخاصة به مؤكداً، حقا، عدم وجود عناصر خافية. ولدواعى تأخير النشر، فقد صدرت هذه الورقة الأولى المهمة عام ١٩٦٦، بعد ظهور ورقته الثانية. والورقة الثانية، التى صدرت عام ١٩٦٤، كانت تحمل العنوان "حول التناقض لدى أينشتين – بودولسكى – روسين"، واحتوت هذه الورقة على "فرضية جون بل" الخلاقة، التى غيرت طريقة تفكيرنا فى ميكانيكا الكم.

وقد استخدم جون بل شكلا خاصا من تناقض EPR ، وهو الشكل الذى تم تنقيحه ليغدو أكثر سهولة على يد دافيد بوهم. وبحث الحالة باعتبار أن جسيمين متعالقين يدوران نصف دورة فى الحالة الأدنى وقد انبعثا من مصدر واحد، وقام بتحليل ما يحدث من خلال تجربة كهذه.

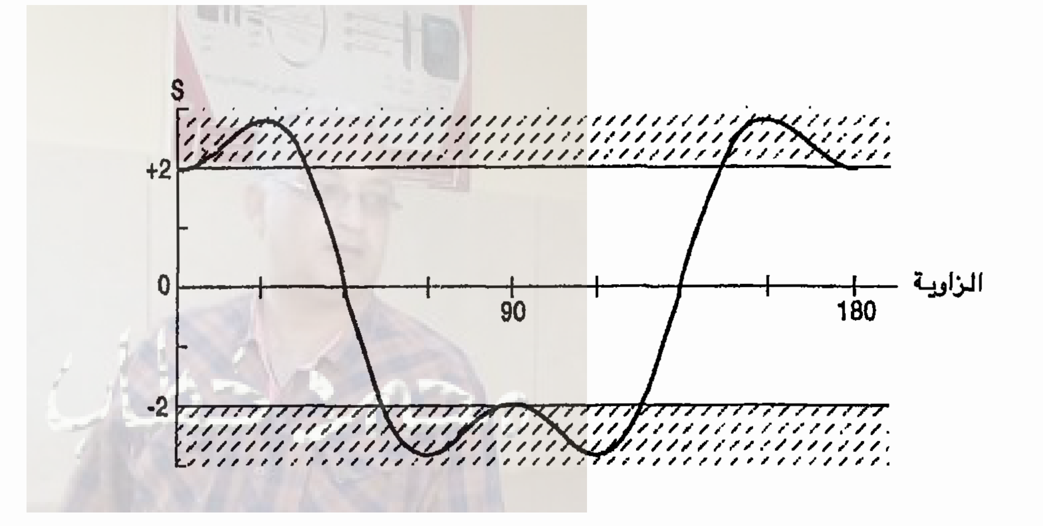
وفى الورقة قال جون بل إن تناقض EPR قد سبق وطرح للجدال بأن نظرية الكم لا يمكن أن تكون كاملة ويتعين استكمالها بمتغيرات إضافية. وهذه المتغيرات الإضافية، وفقًا للورقة EPR ، سوف تعيد إلى ميكانيكا الكم مفاهيمها الغائبة عن السببية والموضع. وباختصار، أورد جون بل نص أينشتين[٢٧] :

"لكن كافتراض أول، يتعين، فى رأيى، أن نتمسك بشدة على نحو مطلق، بأن الوضع الفعلى الحقيقى للنظام S_2 لا يعتمد على ما يحدث مع النظام s_1 ، الموجود على مسافة منه فى الفضاء".

ونصَّ جون بل فى ورقته على أنه سيبين رياضياً أن أفكار أينشتين عن السببية والموضع لا تتوافق مع تنبؤات ميكانيكا الكم. وزاد على ذلك أن مطلب الموضع بأن نتيجة قياس أحد النظامين لا تتأثر بالمعاملات المؤثرة فى نظام آخر بعيدا عنه وسبق أن تفاعلا معا فى الماضى، هو الذى يخلق الصعوبة الأساسية. وتطرح ورقة جون بل فرضية للبدائل: إما أن المتغيرات الخافية للموضع صحيحة، أو أن ميكانيكا الكم صحيحة، وليس كلاهما. وإذا كانت ميكانيكا الكم هى الوصف الصحيح لعالم الجسيمات الدقيقة، إذن فإن اللا موضع هو ملمح مهم لهذا العالم.

وقد طور جون بل فرضيته الرائعة، بافتراضه فى البداية أن ثمة وسيلة لاستكمال ميكانيكا الكم من خلال بنْية متغير خفى، الأمر الذى كان أينشتين سيطلبه. ولذلك فإن المتغيرات الخافية تحمل المعلومات المفقودة. إذ يتم تزويد الجسيمات بمجموعة تعليمات تخبرها مقدما عما ينبغى عليها فعله فى كل وضع احتمالى، أى، فى كل اختيار للمحور بالنسبة إلى طريقة حساب الحركة الدورانية. وباستخدام هذا الافتراض، حصل جون بل على تناقض، اتضح منه أن ميكانيكا الكم غير قابلة للاستكمال بأى نظام للمتغيرات الخافية. وقدمت فرضية جون بل متباينة، وذلك لمقارنة مجموع – الذى يتخذ الرمز S – النتائج المحتملة للتجربة لنتائج الكاشف الموجود لدى أليس، ونتائج الكاشف لدى بوب وجاءت متباينة بل على الصورة : $-2 < S < 2$

كما أن الشكل التالى يوضح هذه المتباينة:



وطبقًا لفرضية جون بل، إذا لم تتحقق المتباينة السابقة بالتجربة، بمعنى أنه إذا كان مجموع الاستجابات الخاصة لدى أليس وبوب أكبر من ٢ أو أقل من سالب ٢، نتيجة لتجربة فعلية لجسيمات أو فوتونات متعالقة - فإن هذه النتيجة تشكل دليلاً واضحًا على اللاموضع Non-locality ، وهو ما يعنى أن ما يحدث لجسيم لا يؤثر - فى اللحظة نفسها - فيما يحدث للجسيم الثانى، بصرف النظر عن مقدار المسافة بينهما. أما ما يتبقّى بعد ذلك فقد بات متروكا للتجريبيين لفحص مثل هذه النتائج.

وهنا برزت مشكلة، مع هذا، فقد اشتق جون بل المتباينة من افتراض عن الموضع باستخدامه لفرضية خاصة. فقد افترض أن نظرية المتغيرات الخافية تتفق تماما مع تنبؤات ميكانيكا الكم عن الجسيمين وهما فى الحالة الأدنى ، بمعنى أنه على أى محور يكون دوران الجسيم الأول فى اتجاه مضاد لدوران الجسيم الثانى على المحور نفسه. وبالتالى، إذا اتفقت القيم التجريبية مع تنبؤات ميكانيكا الكم للمقدار فى متباينة جون بل، فلا تعنى هذه النتيجة خطأ فرض الموضع، إلا إذا وجد دليل على صحة الافتراض الخاص لجون بل، وهو ما يتعذر الحصول عليه عمليا. وهذه المشكلة من شأنها أن تحول دون إجراء الاختبارات التجريبية المحددة. لكن فى وقت لاحق سيضيف كلوزر وهورن وشيمونى وهولت تحسينا يحل هذه المشكلة الفنية، ويتيح تحقيق الاختبار الفيزيائى الفعلى باستخدام فرضية جون بل.

وعلى أية حال، أسفرت فرضية جون بل عن نتيجة فحواها أن المتغيرات الخافية وافتراض الموضع لا مكان لهما فى نظرية الكم، حيث لم يثبت توافقها مع هذين الافتراضين. ولذلك غدت فرضية جون بل نتيجة نظرية بالغة الفاعلية فى الفيزياء.

وسألنى ابنر شيمونى Abner Shimony : "هل تعلم لماذا كان جون بل بالتحديد، وليس أى شخص آخر هو من أخذ على عاتقه تناقض EPR وأثبت فرضية تبرهن على عدم توافق اللاموضع ونظرية الكم معا؟" وواصل: "كان واضحا لجميع من يعرفوه أنه سيحقق ذلك، فإن جون بل شخص متفرد، شغوف، عنيد وجرىء، ويتمتع بشخصية قوية تبز الجميع. لقد واجه فون نيومان متحديا – وهو أكثر الرياضيين شهرة فى هذا القرن – وبلا تردد أوضح أن فرض فون نيومان خاطئ، ومن ثم أعلن تحديه لأينشتين".

فى اعتقاد أينشتين وزميليه أن ظاهرة التعالق بين نظامين فى الفضاء بينهما مسافة كبيرة غير قابلة للتصديق. فلماذا يتسبب ما يحدث فى مكان معين فى التأثير فى الوقت نفسه فى شيء ما فى موضع مختلف؟ إلا أن جون بل استطاع أن يرى ما لم يكن فى متناول حدس أينشتين وأثبت فرضية كانت إلهاما لإجراء تجارب تؤكد أن التعالق ظاهرة حقيقية. اتفق جون بل مع أينشتين اتفاقا مشروطا، لكنه ترك الأمر للتجربة لتختبر ما إذا كان اعتقاد أينشتين عن الموضع صحيحا من عدمه.

وقد توفى جون بل على نحو غير متوقع فى عام ١٩٩٠، عن عمر يبلغ ٦٢ عامًا، بسبب نزيف فى المخ. وكانت وفاته خسارة كبيرة لمجتمع الفيزيائيين، فقد ظل جون بل يواصل عمله بنشاط حتى اليوم الأخير من حياته: يكتب، ويلقى المحاضرات باستفاضة عن ميكانيكا الكم وتجربة EPR الفكرية، وعن فرضيته التى أنشأها. وفى الواقع، مازال الفيزيائيون حتى الآن ينظرون إلى فرضية جون بل – بمضامينها العميقة حول طبيعة المكان – الزمان ، وأسس الكوانتم – كما كانوا ينظرون إليها على مدى العقود الثلاثة الماضية. ولقد وفرت التجارب التى أجريت – ارتباطا بالفرضية غالبًا – دعمًا هائلاً لنظرية الكم وحقيقة ظاهرة التعالق واللاموضع.

الفصل الرابع عشر

حلم كلاوزر، وهورن، وشيمونى

"من أسباب اضطراب فهمنا لميكانيكا الكم مشكلة القياس ومشكلة اللاموضع ...، ويبدو لى من غير المحتمل حل أى مشكلة منهما بدون حل الأخرى، وبدون توافق عميق بين نظرية المكان – الزمان وميكانيكا الكم إحداهما مع الأخرى".

أبنر شيمونى

ينتمى أبنر شيمونى Abner Shimony إلى أسرة يهودية أفرادها من الحاخامات، وكان أسلافه من بين العائلات القليلة جداً التى استمرت إقامتها فى القدس لعدة أجيال، وكان جده لأبيه رئيس الشوخيت Shochet (المشرف على الذبح على الطريقة اليهودية) بالقدس. وولد أبنر فى كولومبس، بولاية أوهايو عام ١٩٢٨، ونشأ فى ممفيس بولاية تينيسى. ومنذ سنواته الأولى، أبدى شغفًا عارمًا بالتعليم، وأثناء دراسته التحق بجامعة ييل Yale لدراسة الفلسفة والرياضيات من عام ١٩٤٤ حتى ١٩٤٨، حتى حصل على درجة البكالوريوس. وقرأ كثيراً فى الفلسفة وخاصة أعمال ألفرد نورث هوايتهيد، وتشارلز بيرس، وكيرت جودل. وأثناء وجوده فى ييل أصبح مهتما أيضا بأصول الرياضيات.

وواصل شيمونى دراساته فى جامعة شيكاغو، ونال شهادة الماجستير فى الفلسفة، ثم ذهب إلى ييل يستكمل عمله بدراسة الدكتوراه، التى حصل عليها فى عام ١٩٥٣ .

وفى جامعة شيكاغو، درس الفلسفة مع شخصية محورية شهيرة من حلقة فيينا Vienna Circle – وهو منتدى فلسفى للنخبة الأوروبية – وهو رودولف كارناب Rudolph Carnap ، الذى أصبح فيما بعد مستشاره غير الرسمى عندما كتب أبنر أطروحته للدكتوراه فى جامعة ييل حول المنطق الحثى inductive logic . ويبدو أن كارناب كان فى حيرة من حقيقة أنه رغم اهتمام أبنر بالمنطق الرياضى والفيزياء النظرية، فقد كان يعتبر نفسه ميتافيزيقيا. إلا أن هذا كان مجالا مناسبا لاهتمامه، نظراً لأنه كان يود أن يصنع مجده من خلال الفيزياء والفلسفة معا، ما إن يفحص بدقة الأوجه الميتافيزيقية لمفهوم التعالق، والتى ستغدو الفكرة المهيمنة عليه وسعيه الدائب فى عمله فى غضون سنوات قليلة.

وفى برنستون، التقى أبنر مع فيلسوف آخر له صلات وثيقة بحلقة فيينا: الرجل الأسطورى كيرت جوديل Kurt Godel . وكان أبنر معجبا بالعقل المتميز الذى أنتج فرضيات عدم الاكتمال الشهيرة وأثبت الحقائق الصعبة حول افتراض التواصل (الديمومة). وبعد ذلك بفترة وجيزة قرر أبنر بأنه ليس حقيقة بالشخص المهتم بأسس الرياضيات فاتجه إلى الفيزياء والفلسفة وانهمك بشدة فى الأصول الفلسفية للفيزياء، ولذلك قام بدراسة الفيزياء ونال شهادة الدكتوراه فى عام ١٩٦٢ . وجاءت أطروحته فى فرع الميكانيكا الإحصائية، وجذبت نظرية الكم انتباه شيمونى، وتأثرت أفكاره بآراء يوجين فيجنر وجون أرشيبالد هويلر.

وكان شيمونى على الدوام يبذل جهدا كبيرا ليُوحِّد بدقة بين اهتماماته الفلسفية والفيزيائية. وجاءت نظرته للفيزياء من خلال وجهة نظر أصولية ورياضية وفلسفية، وهو ما أتاح له امتلاك منظور شامل للنظام المعرفى وموقعه خلال مساعى الإنسان. وفى عام ١٩٦٠، قبل حصوله على رسالته الثانية فى الدكتوراه، التحق بكلية الفلسفة فى MIT (معهد ماساشوستس للتكنولوجيا) ليدرس مقررات من فلسفة ميكانيكا الكم. وبدأ يصنع له اسما فى هذا المجال، وبعد أن نال شهادته الثانية للدكتوراه من برنستون، التحق بكلية فى جامعة بوسطن لتدريس الفيزياء والفلسفة.

ومن وجهة نظر أبنر، لم يكن يتوقع هذه البداية لانطلاق حياة مهنية فى مدرسة لها اعتبارها مثل MIT ، ليعمل بها فى وظيفة ثابتة، ثم ينتقل إلى مدرسة غير مرموقة فى وضعية أدنى إلى حد ما (رغم هذا، نال بها وظيفة ثابتة بسرعة كبيرة). لكن أبنر فعل ذلك لأنه كان يريد أن يتبع قلبه. فقد كان فى MIT وما يزال بها قسم ممتاز للفيزياء، وهذا المعهد، بالفعل، يتباهى بأنه يعمل به عدد من الحاصلين على جائزة نوبل فى الفيزياء، لكن أبنر كان يعمل بقسم الفلسفة، واشتاق للتدريس وإجراء البحوث فى كل من الفيزياء والفلسفة؛ ولذلك استقال من وظيفته الثابتة فى MIT لينتقل إلى منصب مشترك بين قسمى الفيزياء والفسلفة بجامعة بوسطن. وأتاح له عمله الجديد متابعة اهتماماته. ويدين فهمنا إلى حد كبير لظاهرة التعالق المعقدة – من وجهتى النظر الفيزيائية والفلسفية معا– لهذا الانتقال الذى قام به شيمونى إلى جامعة بوسطن.

وفى ١٩٦٣، كتب أبنر ورقة مهمة عن عملية القياس فى ميكانيكا الكم، وبعدها بعام، كتب جون بل ورقته التى كانت تتحدى فهمنا للعالم.

كانت المرة الأولى التى يلتقى فيها أبنر شمونى بمفهوم التعالق فى عام ١٩٥٧ ، ففى تلك السنة، أعطاه مشرفه الجديد فى برنستون آرثر وايتمان Arthur Wightman، نسخة من ورقة EPR وطلب منه على سبيل التدريب ما إذا كان يستطيع أن يكتشف وجود خطأ فى تناول الورقة، وقام شيمونى بدراسة ورقة EPR ، ولم يجد بها أى خطأ. وبمجرد أن ذاعت شهرة فرضية جون بل عقب ذلك بعدة سنوات بين الفيزيائيين، تعين على وايتمان أن يوافق على أن: أينشتين لم يخطئ. فما فعله أينشتين كان للتدليل على عدم اكتمال ميكانيكا الكم من خلال تضافر ثلاث مقدمات منطقية: صحة تنبؤات إحصائية معينة لميكانيكا الكم، والمعيار الكافى على وجود عنصر من الواقع، وافتراض الموضع. وأوضح لنا أينشتين وزميلاه أننا إذا تمسكنا باعتقادنا بأنه أيا كان ما يحدث فى موضع معين فإنه لا يمكن أن يؤثر فى اللحظة نفسها فيما يحدث فى موضع بعيد عنه، لذلك فإن بعض الظواهر التى تتنبأ بها ميكانيكا الكم، لابد أن تتناقض مع هذه الافتراضات. على أن فرضية جون بل، التى تجاهلها الفيزيائيون فى البداية،

هى التى جلبت هذا التناقض إلى السطح على نحو أمكن من خلاله – على الأقل من حيث المبدأ – اختباره فيزيائيا. وتمثّل ما أوضحه جون بل فى أنه حتى إذا كانت جميع المقدمات المنطقية لورقة EPR صحيحة، بما يعنى أنه ينبغى استكمال ميكانيكا الكم بالمتغيرات الخافية، فإنه لا توجد نظرية تستخدم متغيرات خافية للموضع (وهذا، بالطبع، ما كانت ترغب فيه ورقة EPR) ستتفق مع جميع التنبؤات الإحصائية لميكانيكا الكم، وهذا التعارض يجعل بالإمكان إجراء تجربة حاسمة، على الأقل من حيث المبدأ. وكان جوهر هذه الفكرة قد تبلور فعليا فى ذهن أبنر شيمونى.

وذات يوم، فى عام ١٩٦٨، وجد أبنر شيمونى على عتبة بابه أول طالب سيدرس الدكتوراه تحت إشرافه بوصفه أستاذا بقسم الفيزياء بجامعة بوسطن، وكان هذا الطالب هو مايكل هورن، الذى وفد إلى بوسطن بعد حصوله على بكالوريوس فى الفيزياء من جامعة المسيسيبى، وكان متحمسا للعمل مع شيمونى.

ولد مايكل هورن فى جلفبورت Gulfport بولاية المسيسيبى عام ١٩٤٣. وأثناء دراسته بالمدرسة الثانوية، أطلق الاتحاد السوفينى أول سفينة إلى الفضاء، وهى سبوتنيك. وهذه الواقعة التى كان لها تأثير هائل فى تطور العلوم فى أمريكا، شأنها شأن كثير جدا من أوجه حياتنا، كانت ذات تأثير حاسم أيضا فى اختيار مايكل هورن لمسار حياته المهنية.

ومع الاندفاع المحموم كرد فعل لاحراز الروس هذا السبق فى الفضاء، دعت الولايات المتحدة إلى عقد مجلس للعلماء أسمته لجنة دراسة علوم الفيزياء : Physical Sciences Study Committee التى اجتمعت فى MIT لإيجاد وسائل لزيادة قدرات أمريكا التنافسية مع الاتحاد السوفيتى فى مجال العلوم، وخاصة الفيزياء. واستهدفت البرامج تحقيق الولايات المتحدة التفوق فى مناهج تعليم العلوم المضبوطة، وفى جزء من توصياتها، انتدبت اللجنة علماء الفيزياء لتأليف الكتب العلمية التى تساعد على تهيئة الطلاب فى الولايات المتحدة لدراسة الفيزياء والعلوم الأخرى، وقد وجد مايك هورن Mike Horne أحد الكتب المعدة بإشراف اللجنة فى مكتبة بيع بالمسيسيبى وأتى على قراءته باهتمام بالغ.

وكان مؤلف الكتاب أى.ب. كوهين I.B.Cohen مؤرخًا للعلوم فى هارفارد تحت عنوان: The New Physics . وتناول الكتاب نيوتن وفيزيائه "الجديدة" فى القرن الثامن عشر. وفى رأى مايك أنه كتاب جميل، وبلغ اقتناعه به حدا أفضى إلى طلبه سلسلة الكتب كلها بسعر ٩٥ سنتا للكتاب الواحد. واتضح بجلاء مدى نجاح اللجنة على الأقل مع مايكل هورن: اعتماداً على ما اكتشفه فى هذه الكتب، فقد قرر خلال عامه قبل الأخير بالمدرسة الثانوية أن يصبح فيزيائيًا، وحينما التحق بالجامعة فى المسيسيبى، تخصص فى الفيزياء.

وكان مايك على دراية بمراكز الفيزياء الكبرى بالولايات المتحدة، وكان حلمه أن يستكمل دراسات ما بعد التخرج فى واحد منها. وبينما كان ما يزال طالبا بجامعة المسيسيبى، تمكن مايك هورن من قراءة الكتاب الشهير الذى وضعه ماخ Mach عن الميكانيكا. وكانت مقدمة الترجمة الإنجليزية فى طبعة دوفر قد كتبها أستاذ للفيزياء بجامعة بوسطن هو روبرت كوهين. وحاز الكتاب إعجاب مايك وكذلك مقدمة الكتاب، وتمنى لو التقى ذات يوم بروبرت كوهين، لذلك ما أن تقدم بطلب التحاق بجامعة بوسطن، سأل فى رسالته عما إذا كان البروفيسير كوهين مستمرا بالعمل بها. وبعد عدة سنوات، بعد أن صنع مايك هورن اسمه كرائد فى أسس الفيزياء، أفضى إليه روبرت كوهين بأن حقيقة أنه قد سأل عنه، جعلت الأمر مختلفا فى الواقع. وكان واضحا أن كوهين قد استراح لهذا الإطراء، حتى إنه حث باقى أعضاء قسم الفيزياء بجامعة بوسطن على قبول هورن فى برنامج عام ١٩٦٥ .

جذبت أسس الفيزياء اهتمام مايكل هورن بمجرد أن غدا مهتما بالعلوم نفسها. لذلك فور قبوله دارسا فى جامعة بوسطن، قام بتنفيذ أعمال الدراسة الخاصة بالعامين الأولين، وبدأ فى التو يعمل مع البروفيسير تشارلز ويليس فى مجال خاص بأسس الفيزياء الإحصائية. وكان ويليس مهتما بمسألة استنتاج قواعد للميكانيكا الإحصائية من الميكانيكا، وكذلك بالمسائل المماثلة. وبعد إجراء بحوث مع ويليس لبعض الوقت، توجه هورن ببعض الأسئلة أدت بويليس للاعتقاد بأن طالبه سيستفيد من الحديث مع فيلسوف الفيزياء بجامعة بوسطن أبنر شيموني، ولذلك أرسله ليلتقى به.

وقد أعطى شيموني الورقتين اللتين كتبهما جون بل إلى هورن، وكانتا قد وصلتا إليه مؤخراً من أحد أصدقائه. وأدرك أبنر أن الورقتين على جانب عظيم من الأهمية، ومن المحتمل أن يهملهما أغلب العاملين بالفيزياء. ولثقته بأن أمامه طالبا له عقلية مرتبة وذا اهتمام كبير بأسس نظرية الكم، فقد سلمه أبنر الورقتين قائلاً: "اقرأ هاتين الورقتين وانظر ما إذا كنا نستطيع التوسع فيهما واقتراح إجراء تجربة حقيقية لاختبار ما يطرحه جون بل هنا". وعاد هورن إلى منزله وبدأ يتأمل أفكارهما الغامضة وإن كانت عميقة، والتي غابت عن انتباه الكثير من الفيزيائيين. فما كان ما يطرحه جون بل فى ورقته هو أمر بالغ الأهمية. كان جون بل يعتقد أن التزام أينشتين بالموضع من المحتمل أن تدحضه التجربة (رغم ما كان يبدو من أنه يتمنى أن تنتصر وجهة نظر أينشتين). هل كان من الممكن تصميم تجربة فعلية يمكن من خلالها اختبار ما إذا كانت فكرة واقعية الموضع لأينشتين صحيحة، أو الأرجح أن تكون ميكانيكا الكم - بمضامينها عن اللاموضع - هى الصحيحة بدلا منها؟ وقد تكون تجربة على هذا النحو على جانب هائل من القيمة للفيزياء.

ولد جون إف كلاوزر John F. Clauser عام ١٩٤٢ فى كاليفورنيا، حيث كان أبوه وعمه وكذلك عدد آخر من أفراد أسرته قد التحقوا بمعهد كالتك (معهد كاليفورنيا للتكنولوجيا) وحصلوا على شهادات منه. وحاز أبوه فرنسيس كلاوزر، درجة الدكتوراه فى الفيزياء من كالتك، وكثيرا ما دارت بالمنزل مناقشات عميقة حول الفيزياء. وقد جرت هذه النقاشات منذ كان جون بالمدرسة الثانوية، لذلك فقد أضحى منغمسا فى تراث من النقاش حول معنى ميكانيكا الكم وأسرارها. وقد شدد عليه والده ألا يتقبل بسهولة ما يقوله الناس له، لكن يتعين عليه أن يتفحص البيانات التجريبية، وكان هذا هو المبدأ المرشد للحياة المهنية لجون كلاوزر.

التحق جون بمعهد كالتك، وهناك، أثناء دراسته للفيزياء، كان يطرح الأسئلة وكان كلاوزر متحمسا لدروس عالم الفيزياء الأمريكى الشهير ريتشارد فينمان، الذى كان يعمل بقسم الفيزياء التابع للمعهد، ودائما كانت تدور من حوله الروايات والأساطير داخل أسوار المعهد. وكان أول لقاء جاد لجون بميكانيكا الكم حين شهد محاضرات

فينمان، التى تم تجميعها بعد ذلك فى سلسلة كتب شهيرة صدرت تحت عنوان "Feynman's Lectures on Physics" . وقد اختص الجزء الثالث منها بنظرية الكم، وفى بداية هذا الكتاب أورد فينمان دعواه، وفحواها أن نتيجة تجربة يانج للشق المزدوج تنطوى على اللغز الجوهرى والوحيد لميكانيكا الكم.

وسرعان ما أدرك كلاوزر إلى أين تتجه العناصر الرئيسية فى أسس ميكانيكا الكم، وبعد عدة سنوات، حينما قرر أن يختبر متباينة جون بل وتناقض EPR ، ذكر هذه الرغبة لأستاذه السابق، وطبقا لما ذكره كلاوزر: "طردنى فينمان إلى خارج مكتبه".

وبعد استكمال دراسته فى كالتك، أجرى جون كلاوزر مشروع التخرج فى الفيزياء التجريبية بجامعة كولومبيا. وكان هناك فى نهاية ستينيات القرن العشرين، يعمل تحت إشراف باتريك تاديوس Patrick Taddeus فى الكشف عن الإشعاع على خلفية الميكروويف، التى استخدمها فيما بعد علماء الكوزمولوجى لدعم نظرية الانفجار العظيم. لكن برغم أهمية المسألة، انجذب كلاوزر إلى مجال مختلف فى الفيزياء: أسس نظرية الكم.

وفى عام ١٩٦٧ كان كلاوزر يطالع بعض مجلات الفيزياء العويصة فى معهد جودارد Goddard Institute لدراسات الفضاء، ولاحظ مقالا أثار شغفه. كان كاتبه هو جون بل. وقرأ كلاوزر المقال، وفى الحال أدرك شيئًا لم يلاحظه علماء الفيزياء الآخرون: كان مقال جون بل ينطوى على إمكانيات لمضامين هائلة تتعلق بأسس ميكانيكا الكم. فقد أعاد جون بل للحياة تناقض EPR القديم وكشف عن عناصره الأساسية. أكثر من هذا، عرض جون بل – ملتزما بالموضوعية فى فرضيته – وسيلة للاختبار التجريبى للجوهر العميق لميكانيكا الكم، ولم تكن فرضية جون بل مفاجئة تمامًا لكلاوزر نظرًا لأنه كان مطلعا على أبحاث دافيد بوهم وتوسيعها لفكرة الورقة EPR فى بحثه الذى نشره عام ١٩٥٧ ، وكذلك على أبحاث دى برولى. ولأنه تربى على الشك، حاول كلاوزر البحث عن أى خلل فى حجج جون بل. وأنفق زمنا طويلاً يسعى لإيجاد مثال مضاد، محاولا تفنيد فرضية جون بل المميزة. لكن بعد أسابيع أمضاها فى البحث والتمحيص بات كلاوزر مقتنعا بأن الفرضية لا تشوبها شائبة، وأن جون بل على صواب. وحان الوقت فى ذلك الحين للاستفادة من الفرضية، واختبار الأسس الدقيقة لعالم الكوانتم.

كانت ورقة جون بل واضحة لكلاوزر بكل جوانبها فيما عدا النواحى التجريبية لتنبؤات الفرضية، التى دفعت كلاوزر، المتسم بالحذر، إلى اتخاذ قراره بأن يجتهد فى دراسة الأدبيات الفيزيائية باحثا عن التجارب التى ربما أغفلها جون بل، والتى قد تلقى الضوء على القضية التى تناولتها الفرضية. الشيء الوحيد الذى استطاع كلوزر أن يجده، مع هذا، كان تجربة وو Wu وشاكنوف عن الانبعاث البوزيترونى (انطلاق اثنين من الفوتونات عالية الطاقة كنتيجة لتدمير الإلكترون والبوزيترون أحدهما للآخر) التى أجريت عام ١٩٤٩، والتى لم تتناول بشكل كامل مسألة الارتباط. ولم توفر ورقة جون بل من خلال سطورها جميعا وسيلة واضحة للتجريبيين عن كيفية إجراء تجربة. ونظراً لأن جون بل كان على نحو واضح عالما نظرياً، افترض – كما يفعل النظريون غالبا – تجهيزات تجريبية مثالية: أى جهازا مثاليا لا وجود له بالمعمل، وكذلك تحضيرا مثاليا للجسيمات الدقيقة ذات الصلة. كان الوقت قد حان ليتقدم شخص آخر ضليع فى الفيزياء النظرية والتجريبية على حد سواء ويبدأ من حيث انتهى جون بل، ويقوم بتصميم تجربة واقعية.

ذهب كلاوزر إلى كولومبيا ليتحدث مع مدام وو ويسألها عن التجارب التى أجرتها على البوزيترون. وكما أوضح بوهم وأهارونوف فى عام ١٩٥٧، فإن زوج الفوتونات الناتجين بهذه الطريقة يتعالقان. وسأل مدام وو عما إذا كانت قد أجرت قياسات لمعاملات الارتباط بين الفوتونات فى تجاربها. فقالت إنها لم تفعل ذلك. وكان كلاوزر يعتقد بأنها لو كانت قد أجرت هذه القياسات لأمكنه الحصول منها على النتائج التجريبية التى يحتاج إليها ليختبر متباينة جون بل. (لم تستطع وو إجراء مثل هذه القياسات لأن الفوتونات عالية الطاقة الناجمة عن الإبادة البوزيترونية لا تقدم معلومات كافية عن معامل ارتباط الاستقطاب لكل زوج على حدة من أجل اختبار متباينة جون بل، كما كان كل من هورن، وشيمونى، وكلاوزر على وشك اكتشاف ذلك كل منهم مستقلا عن الآخر). وطلبت وو من جون كلاوزر الذهاب إلى طالبها المتخرج لن كاسداى Len Kasday ليتناقش معه، والذى كان يعيد إجراء تجاربها على البوريتزون التى أجرتها منذ عقود. وفى النهاية فإن تجربة كاسداى – وو الجديدة (التى أجريت بالاشتراك مع أولمان J. Ullman)

أمكنها قياس معاملات الارتباط هذه واستخدمت بعدها فى اختبار متباينة جون بل. وأدت النتائج، التى نشرت فى عام ١٩٥٧، إلى إضافة أدلة جديدة لصالح ميكانيكا الكم. رغم أنه لقياس معاملات الارتباط، تعين على كاسداى ووو إدخال فروض قوية إضافية لم يتمكنا من اختبارها، مما أضعف من نتائجهما. لكن ذلك تحقق بعد سنوات فى المستقبل. أما فى ذلك الحين، فقد أدرك كلاوزر أن نتائج وو وشاكنوف عديمة الجدوى فى اختبار متباينة جون بل، وكان عليه أن يسعى لتطوير إجراء جديد.

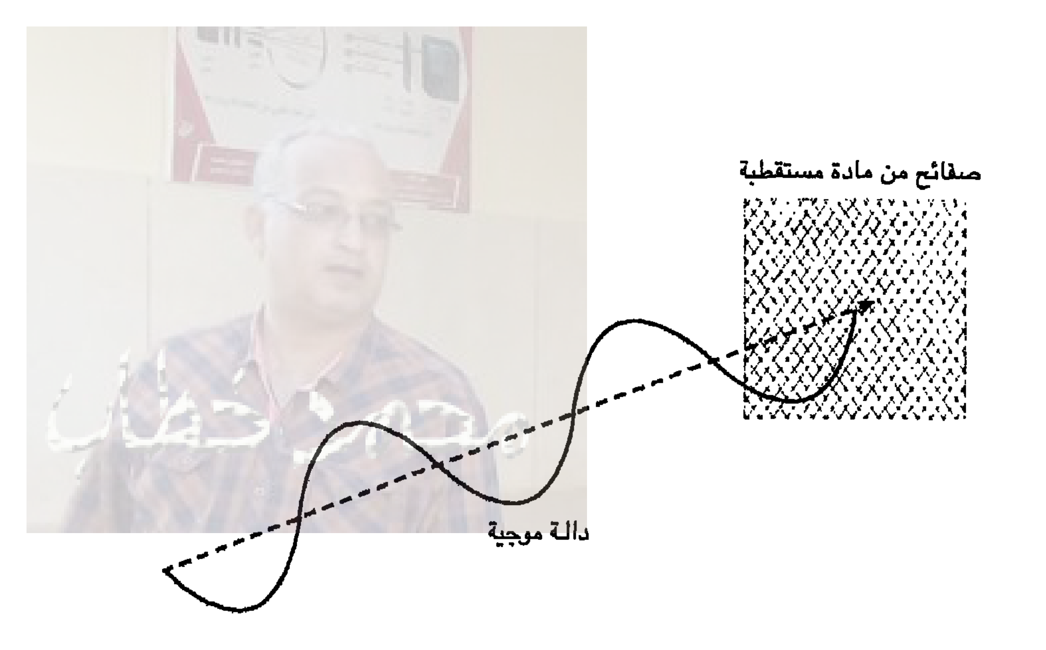
لم يكن أمام كلاوزر سوى أن يواصل العمل بمفرده، متجاهلاً تقريبا ما كان مفروضا عليه أن يقوم به فى مجال أطروحته العلمية حول الإشعاع على خلفية الميكروويف. إلا أن رد فعل زملائه الفيزيائيين لم يكن مشجعا، فقد كان يبدو عدم الاقتناع على من تحدث معهم بأن متباينات جون بل تستحق الإثبات تجريبيا. وانقسم الفيزيائيون بين من يعتقد أن مثل هذه التجارب لا يمكن أن تسفر عن نتائج، ومن يعتقد أن بوهر قد انتصر فعليا فى جداله مع أينشتين منذ ٣٠ عامًا مضت، وأن أى محاولات جديدة للتوفيق بين اعتراضات أينشتين وردود بوهر ليست إلا تبديداً للوقت. كان كلاوزر قد عقد العزم. وبإعادة تمحيص نتائج تجربة وو - شاكنوف القديمة، استنتج كلاوزر أنه يلزم شىء آخر خارج نتائج تجربتهما من أجل اختبار ميكانيكا الكم فى مقابل نظريات المتغيرات الخافية بالطريقة التى تقترحها نظرية جون بل. وثابر فى عمله على حل المسألة، وفى عام ١٩٦٩ توصل أخيرا إلى اختراق، وكنتيجة له أرسل ملخصا لورقة ليتم عرضها فى مؤتمر للفيزياء، تقترح كيفية إجراء تجربة تختبر متباينة جون بل. ونُشر الملخص الذى قدمه كلاوزر فى نشرة اجتماع واشنطن للجمعية الفيزيائية الأمريكية فى ربيع ١٩٦٩ .

وعودة إلى بوسطن، فقد أمضى أبنر شيمونى ومايك هورن وقتا طويلاً فى أواخر عام ١٩٦٨ وأوائل ١٩٦٩، يعملان بدأب فى تصميم ما اعتقدا أنها واحدة من أهم التجارب التى يمكن أن يتوصل إليها الفيزيائيون. واتخذا مسارا يماثل إلى حد كبير ما سار فيه كلاوزر فى نيويورك. ويقول مايك هورن مستعيداً الأحداث: "أول خطوة قمت بها بعد أن

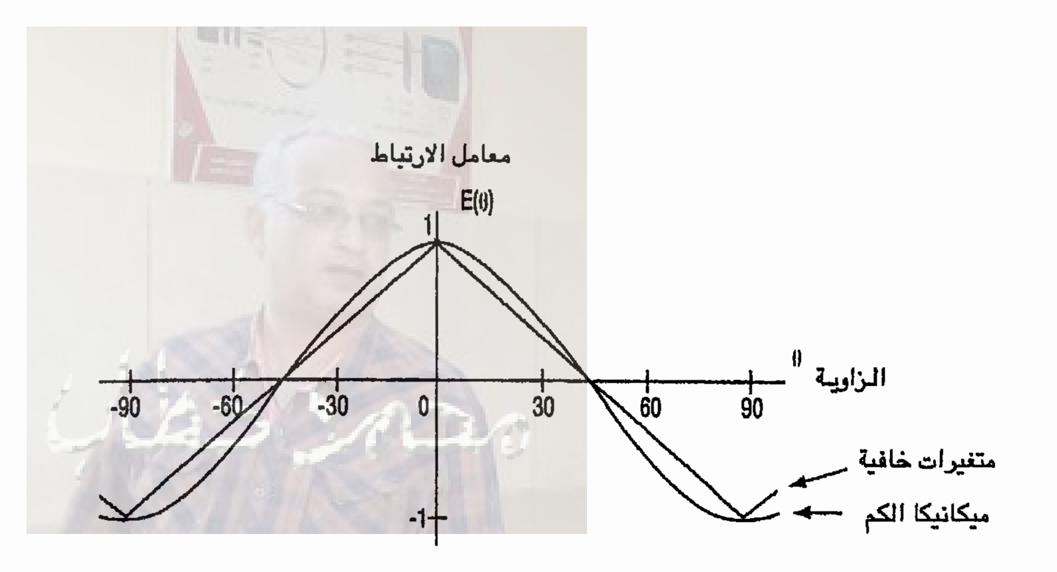
حصلت على تفويض من أبنر كان أن تفحصت نتائج تجربة وو وشاكنوف". وأدرك مايك أن تجربة وو وشاكنوف عن التدمير البوزيتروني، لابد أن لها صلة ما بالموضوع الذى تناولته فرضية جون بل؛ لأن زوج الفوتونات المنبعث عن الإلكترون والبوزيترون - أثناء التدمير المتبادل بينهما - يتعين عليهما أن يتعالقا. إذن فقد كانت المسألة أن لدى زوج الفوتونات طاقة عالية جداً. ونتيجة لاستقطابهما غدا قياسهما أكثر صعوبة مقارنة بفوتونات الضوء المرئى. ولعرض معادلات ارتباط الاستقطاب، قامت وو وشاكنوف بتفريق أزواج الفوتونات بعيدا عن الإلكترونات ("تفريق كومبتون "Compton Scattering). وطبقًا لمعادلات ميكانيكا الكم، فإن معاملات الارتباط بين اتجاهات الاستقطاب للفوتونات تكون ضعيفة التحول من خلال تأثير كومبتون إلى معاملات ارتباط الاتجاهات فى فضاء الجسيمات الدقيقة المتفرقة: بمعنى: أعلى - أسفل، لليمين - لليسار، أو إلى أى موضع فيما بينهما. وانتاب الشك مايك، كما انتاب كلاوزر من قبل، من أن هذا التحول بالغ الضعف ويتعذر تماما الإفادة منه فى تجربة لإثبات فرضية جون بل، وللبرهنة على ذلك مرة وإلى الأبد، قام مايك بتصميم نموذج رياضى محدد للمتغيرات الخافية يتفق تماماً مع متطلبات الموضع والواقع فى ورقة EPR إلا أنه أسفر عن التوصل إلى النتائج نفسها تماما المماثلة للتنبؤات الكمية لتفريق كومبتون المشترك.

وهكذا، فإن النتائج التجريبية لتجربة وو - شاكنوف أو أى تحسينات مستقبلية على تجربتهما باستخدام تشتت (تفريق) كومبتون - لا يمكن استخدامها للتمييز بين البديلين: متغيرات الموضع الخافية (حسب اقتراح أينشتين) فى مقابل ميكانيكا الكم. إذن لابد أن شيئًا ما جديداً تماما يتعين تصميمه.

وعرض مايك على أبنر نموذجه المحدد لمتغيرات الموضع الخافية، وقرر الاثنان أن فوتونات الضوء المرئى هى اللازمة لإجراء التجربة. ويلزم وجود صفائح لعملية الاستقطاب ومناشير من الكالسيت، وبعض الأجهزة البصرية الأخرى، وذلك لتحليل اتجاه الاستقطاب لفوتونات الضوء المرئى. والجهاز التالى يوضح ذلك.



وتوجه أبنر إلى عدد من التجريبيين طالبا النصيحة فى مثل هذه التجارب، وعلم أخيرا من جوزيف شنايدر Joseph Snider ، وهو زميل دراسة قديم فى برنستون، وعمل بعدها فى هارفارد – أن تجربة لقياس معامل الارتباط الضوئى من النوع المطلوب قد أجريت بالفعل فى بيركلى على يد كارل كوشير ويوجين كومنز Eugene Commins . وسرعان ما اكتشف أبنر ومايك أن تجربة كوشير وكومنز تستخدم زاويتى استقطاب فقط هما الصفر والزاوية ۹۰° – لذلك لا يمكن استخدام نتائجهما لاختبار متباينة جون بل، لأن الزاويا المحصورة بين هاتين الزاويتين هى المطلوبة لتحدد نتيجة الاختبار. ومن الناحية التقنية، من أجل إجراء الاختبار بالغ الحساسية اللازم للفصل بين البديلين فى فرضية جون بل (نظرية الكم في مقابل المتغيرات الخافية)، لابد من إجراء التجربة باستخدام مجال واسع من هذه الزوايا كالمبين بالشكال التالى:



وكما نرى من الشكل أعلاه، فإن الفرق بين نظرية الكم ونظريات المتغيرات الخافية فرق محدود جدا. ولا يستطيع أى باحث أن يكتشف أيا منهما هو الصحيح إلا من خلال التمحيص بالغ الدقة لما يحدث مع أزواج الفوتونات كلما تغيرت مقادير الزاويا بينهما. وعمل مايك وأبنر فى تصميم التجربة الفعلية بكل مستلزماتها حتى يمكن لنتائجها أن تحدد البديل الصحيح بين البديلين: أينشتين أم ميكانيكا الكم.

وأمكنهما بسرعة إدخال تعديلات على تجربة كوشير - كومنز تتيح للفيزيائى اختبار متباينة جون بل فى ظل شروط مثالية. وكل ما كان على التجريبى أن يفعله هو قياس اتجاه استقطاب كل فوتون لزوج متعالق على المحاور المناسبة، وهو ما يختلف عن تجربة كوشير وكومنز. وهنا برزت مشكلة تتمثل فى حقيقة أن عدداً محدودا من أزواج الفوتونات، هى التى تستجيب للشرط المثالى للانبعاث عند الزاوية التى قياسها ١٨٠ درجة. لذلك وفى المرحلة التالية، خفف هورن وشيمونى من هذا الافتراض غير الواقعى والصارم، وسمحا بتجميع أزواج الفوتونات بزوايا يختلف قياسها عن ١٨٠°. وبهذا الإجراء، مع هذا، فمازالت الحاجة ماسة إلى حسابات بالغة التعقيد لتحليل النتائج

التجريبية. وبمساعدة ريتشارد هولت Richard Holt ، وهو أحد طلاب فرانك ببكين Frank Pipkin فى جامعة هارفارد، والذى كان مهتما بالتجربة، تمكن مايك هورن من حساب التنبؤات الكمية - الميكانيكية لمعاملات ارتباط الاستقطاب فى هذه الحالة الواقعية. والمثير فى الأمر، أن هذه الحسابات اتفقت مع الحسابات التى أجريت بعد عامين من ذلك على يد أبنر شيمونى مستخدما القواعد الكمية - الميكانيكية لإضافة كمية الحركة الزاوية.

وذكر لى شيمونى: "كانت هذه بوضوح أفضل أوراقى فى الفيزياء" وهو يصف لى هذه الورقة التى كتبها مع مايك حول تصميم تجربة لاختبار متباينات جون بل - خلال نتائج معملية فعلية من أجل اكتشاف ما إذا كانت الطبيعة تتصرف على نحو يتفق مع وجود متغيرات خافية للموضع أو طبقا لقواعد ميكانيكا الكم. والمفترض فى التجربة التى قدماها أن تستخدم فرضية جون بل السحرية لتحديد أى احتمال من الاثنين هو الحقيقى: إصرار أينشتين على أن ميكانيكا الكم نظرية غير كاملة، أو كفاح بوهر لإثبات أنها نظرية كاملة. ولتقرير صحة نظرية الكم كان على التجربة أيضًا أن تكشف ما إذا كان ثمة احتمال لـ "فعل للأشباح عن بعد" الأمر الذى كان يخشاه أينشتين، بمعنى، تعالق اللاموضع. وبدون معرفة مسبقة منهما، كانت أفكارهما آنئذ قد تعالقت فعليا مع أفكار فيزيائى آخر، هو جون كلاوزر، الذى كان منهمكًا فى بحث المسألة نفسها لكنه فقط يبعد عنهما مائتى ميل.

وأثناء إجراء تجهيزاتهما، تحدث هورن وشيمونى مع كثير من الخبراء، وقال شيمونى "كنا مصدر إزعاج". سألا التجريبيين عن التقنيات المختلفة التى تتيح لهما اختبار النظرية، وتعين عليهما البحث عن جهاز يمكنه بث أزواج فوتونات منخفضة الطاقة وتستطيع أن تتعالق مع بعضها البعض، ويحدد وسيلة لقياس استقطابها، ويقيس التنبؤات الكمية الميكانيكية لمعاملات ارتباط هذه الاستقطابات، ويوضح أن معاملات الارتباط المقاسة قد انتهكت متباينة جون بل. وبعد شهور طويلة من العمل، توصلا فى نهاية المطاف إلى تصميم، وغدت الورقة كاملة تقريبا. وراودهما الأمل فى

تقديمها أثناء اجتماع الربيع للجمعية الأمريكية للفيزياء فى واشنطن العاصمة، إلا أنهما تأخرا عن الموعد النهائى لتقديم الورقة. ويقول شيمونى: "كنت أفكر، وما أهمية ذلك؟" وأضاف: "مَنْ غيرنا، سيعمل فى مثل هذه الموضوعات الغامضة؟ وهكذا أخذنا وجهتنا إلى المؤتمر، وأعددنا ترتيبات لإرسال الورقة مباشرة إلى إحدى المجلات. ثم حصلت على محاضر جلسات المؤتمر، وتوقفت أمام الأخبار السيئة. لقد توصل شخص آخر إلى الفكرة نفسها تماما". وكان هذا الشخص هو جون كلاوزر.

اتصل أبنر هاتفيا بمايك صباح يوم سبت، وقال "لقد سبقنا شخص آخر". والتقى الاثنان يوم الاثنين التالى بقسم الفيزياء فى جامعة بوسطن، وطلبا النصيحة من فيزيائيين آخرين: "ماذا نفعل؟ ثمة شخص آخر سبقنا إلى ما فعلناه ...". جاءت معظم الإجابات: "تظاهرا بأنكما لم تعلما شيئًا عن هذا، وما عليكما إلا إرسال الورقة إلى إحدى المجلات". إلا أن ذلك بدا لهما غير مناسب. وفى النهاية قرر أبنر أن يتصل هاتفيا بمشرفه السابق على رسالة الدكتوراه فى برنستون والحائز على جائزة نوبل يوجين فيجنر الذى اقترح عليه: "عليك الاتصال بالرجل، وتحدث معه فى الموضوع". وهو ما فعله أبنر. اتصل هاتفيا بجون كلاوزر فى نيويورك.

لولا الأمانة والاستقامة، لكان لهذه المكالمة التليفونية عواقب غير سارة. إذ يميل العلماء لأن يكونوا حيوانات تتشبث بما تملك، تتأكلهم الغيْرة على ما ينافسون عليه. ونظراً لأن كلاوزر كان قد نشر فعلا ملخص ورقة تشابه إلى حد بعيد تلك الورقة التى انهمك فيها هورن وشيمونى بجد بالغ، فربما كان لن يستجيب بصورة طيبة للقادمين الجدد للمشروع نفسه.

على أن كثيراً من الناس عندما يجدون أنفسهم فى موقف مشابه قد يرددون: "هذا مشروع بحثى أنا ، وقد فات أوان فكرتك التى حصلت عليها!" ويغلق الهاتف. لكن جون كلاوزر لم يكن من هؤلاء الناس. وكان مفاجأة عظيمة لأبنر ومايك، هذا الرد الإيجابى لكلاوزر. وقال لى مايك هورن وهو يسترجع تلك اللحظة المصيرية: "كان يهتز طرباً وهو يسمع أننا نعمل بالموضوع نفسه. موضوع كان يبدو أنه ما من أحد آخر يهتم به".

بالفعل، كان لدى شيمونى وهورن سلاح سرى تحت تصرفهما، الأمر الذى جعل كلاوزر يقبل راضياً بالتعاون معهما. كان الاثنان قد نالا من قبل موافقة فيزيائى أبدى استعداده لإجراء التجربة فى معمله. وهذا الشخص هو ريتشارد هولت، الذى كان يعمل حينذاك بجامعة هارفرد. وبالإضافة إلى أمانته فقد كان سعيداً حين وجد روحين أخريين مهتمتين بالمجال نفسه المفعم بالأسرار والذى خلب لبه، وأدرك كلاوزر أنهما استطاعا البدء فى التجربة، وأراد أن تكون المشاركة فيها فعالة. وللمصادفة، فقد جاء تصميم كلاوزر للتجربة يحتوى على الشروط المثالية نفسها التى وضعها أصلا هورن وشيمونى – التقيد بأزواج الفوتونات التى تفصل بينها زاوية قياسها ١٨٠ درجة – وبدأوا فى عملية الحذف بالتعاون مع هولت.

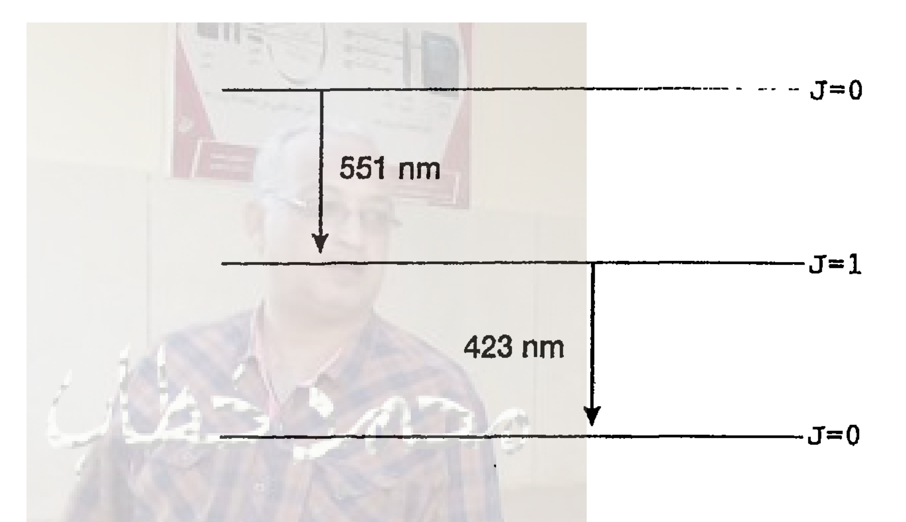
وفكر جون كلاوزر أنه لو كان بمفرده، لأصبح عليه أن يتولى البحث عن وسائل لإجراء التجربة التى يسعى إليها، أما الآن فهناك مايك هورن، وأبنر شيمونى، وريتشارد هولت، على استعداد للتقدم للأمام. ولم يضطر للتفكير ولو لدقيقة واحدة. لقد عقد العزم على الاشتراك معهم.

وشرع الأربعة: شيمونى، وهورن، وكلاوزر، وهولت، فى تعاون بالغ الفائدة فى تناول المسألة، وفى غضون فترة قصيرة كتبوا ورقة مبدعة تعرض تفصيلياً كيفية إجراء تجربة محسنة لتصل إلى إجابة محددة على تساؤل جون بل: ما هو الجواب الصحيح، واقعية الموضع لأينشتين، التى يقول إن ما يحدث هنا لا يؤثر فيما يحدث فى مكان آخر، أو ميكانيكا الكم: التى تبيح حدوث تعالق لا صلة له بالموضع؟

وفى عام ١٩٦٩، نشرت ورقة كلاوزر – هورن – شيمونى – هولت (C H S H) فى مجلة Physical Review Letters ، وتضمنت تعديلا نظرياً مهمًّا على اشتقاق جون بل الرائد للمتباينة التى وضعها. وبالإضافة إلى وجود متغير خاف يحدد موضعياً (مكانياً) نتيجة أى قياس، فقد افترض جون بل شرطا ملزما استعاره من ميكانيكا الكم وهو: إذا كان قد تم قياس المقدار الملاحظ نفسه فى كلا الجسيمين، لذا يتعين بالضرورة أن

تكون النتائج مرتبطة ارتباطًا صارمًا. وقد احتوى اشتقاق بل فى المتباينة بصورة أساسية على هذا الشرط. إلا أن كلاوزر وهورن وشيمونى وهولت تخلصوا من هذا الشرط الذى افترضه جون بل، وبالتالى أدخلوا تحسينا على المتباينة. واحتوت باقى الورقة على توسعات فى تصميم تجربة كارل كوشير ويوجين كومنز فى بيركلى حيث كان ينبعث منها زوج من الفوتونات يمكن قياس معامل الارتباط بين اتجاهى استقطابهما، والتى أجرياها فى عام ١٩٦٦، دون أن يعلما شيئًا عن فرضية جون بل.

كان كوشير وكومنز قد استخدما طريقة الشلال الذرى **atomic cascade method** لإنتاج الفوتونات المترابطة، واتفقت معهما ورقة **CHSH** على أن هذه هى الطريقة الملائمة لتجربتهم. فى هذه الحالة يتم إثارة ذرة لينبعث منها زوج من الفوتونات وهى تنحل إلى مستويين لأدنى؛ ويحدث التعالق بين الفوتونين. وكان مصدر الفوتونين هو تيار من ذرات الكالسيوم ينبعث من فرن ساخن. ويتم تسليط إشعاع قوى للأشعة فوق البنفسجية على تيار الذرات. ويتسبب هذا الإشعاع فى إثارة إلكترونات ذرات الكالسيوم إلى مستوى أعلى، وما أن تهبط مرة أخرى، ينطلق منها أزواج من الفوتونات المرتبطة. ويُطلق على هذه العملية الشلال الذرى لأنه من خلالها يهبط شلال إلكترونى من مستوى أعلى، ماراً بمستوى متوسط، ليصل فى الختام إلى مستوى نهائى، وينطلق منه فوتون عند كل مستوى يصل إليه. ونظراً لأن المستوى الابتدائى والمستوى النهائى كليهما حالتان إجمالى كمية الحركة الزاوية فى كل منهما تساوى الصفر، كما أن كمية الحركة الزاوية تخضع لقانون حفظ كمية الحركة - إذن تكون كمية الحركة الزاوية لزوج الفوتونات المنبعث تساوى صفرا. وهذه حالة من حالات التماثل عالى المستوى والارتباط الاستقطابى القوى بين الفوتونين. والشكل التالى يوضح فكرة شلال ذرى:



وتضمنت ورقة CHSH فى ختامها ملحوظة تقر بأن تلك الورقة تعرض إضافة لأفكار جون كلاوزر التى تقدم بها فى اجتماع الربيع إلى الجمعية الأمريكية للفيزياء لعام ١٩٦٩ . وهكذا فإن الحال الذى كان ينطوى على احتمالات تنافسية أسفر فى النهاية عن تعاون عظيم الأهمية، وأوجد تعالقًا بين حيوات أربعة من الفيزيائيين. وبعد عدة سنوات يستعيد جون كلاوزر ذكرياته قائلاً: "أثناء عملية كتابة هذه الورقة أنشأ أبنر ومايك، وأنا، علاقة صداقة دامت طويلاً أسفرت عن التعاون الذى أعقبها لمرات عديدة".

وبعد حصول كلاوزر على شهادة الدكتوراه من جامعة كولومبيا، انتقل إلى جامعة كاليفورنيا فى بيركلى ليستأنف عمله بها مع الفيزيائى الشهير تشارلز تاونس Charles Townes الحائز على جائزة نوبل لمشاركته فى اكتشاف أشعة الليزر. وكان المشروع البحثى لما بعد الدكتوراه لكلاوزر فى مجال علم الفلك الإشعاعى. لكن – كما حددت من قبل – كان اهتمامه محدوداً بكل ما هو خارج أسس ميكانيكا الكم. والآن، بعد عمله الفذ فى اختبار متباينة جون بل، ولنجاحه فى ورقته المشتركة CHSH ، لم يطق صبرًا بالعمل فى مجال آخر. كان كلاوزر على استعداد لإجراء التجارب الفعلية. كانت ورقة CHSH هى برنامج العمل لهذه التجربة التاريخية. ولحسن حظ جون، كان جينى كومنز Gene Comins ما يزال فى بيركلى. ولذلك اتصل كلاوزر بشارلز تاونس وسأله إن كان لا يجد مانعا إن أمضى هو – كلاوزر – بعض الوقت بعيدا عن علم

الفلك الإشعاعى فى محاولة لإجراء تجربة CHSH . وكانت موافقة تاونس مفاجأة له، علاوة على أنه اقترح على كلاوزر أن يقضى نصف الوقت فى المشروع. كان جينى كومنز سعيداً أيضًا بالتعاون فى مشروع يعتمد على تجربته السابقة مع كوشر، وبالتالى قدم إلى كلوزر طالبه المتخرج ستيوارت فريدمان Stuart Freedman ليساعده فى إجراء التجربة. وبعد عودته إلى بوسطن، ذهب أبنر ومايك يفتشان عنه.

شرع كلاوزر وفريدمان يعدان الأجهزة اللازمة للتجربة. وكان كلاوزر يدفع فريدمان للعمل بجد أكثر وسرعة أكبر. كان يعلم أنه فى حال عودته إلى هارفارد، سيجد ريتشارد هولت، شريكه فى ورقة CHSH يجهز تجربته الخاصة. وكان فريدمان، البالغ من العمر ٢٥ عامًا، طالب دراسات عليا لا يهتم كثيراً بأسس ميكانيكا الكم، لكنه كان يعتقد أنها بالتأكيد تجربة بالغة الإثارة. كان كلاورز فى لهفة شديدة لإنهاء التجربة؛ وكان يعلم أن هولت وبيبكين فى هارفاد يشقان طريقهما بقوة، وهو يريد أن يكون أول من يختبر صحة نظرية الكم. كان يراهن فى أعماقه ضد نظرية الكم، معتقداً أن ثمة فرصة طيبة لإثبات صحة مقولة أينشتين عن المتغيرات الخافية وأن ميكانيكا الكم ستنهار بسبب تعالق الفوتونات.

فى وقت سابق، حين كان كلاوزر لا يزال يعمل منفردا على ورقته فى تصميم التجربة، كتب إلى جون بل، وبوهم، ودى برولى، يسألهم عما إذا كانت لهم معرفة بتجارب مشابهة، وعن مدى اعتقادهم بأهمية تجربة من هذا النوع. وجاءت ردود الجميع تنفى علمهم بإجراء تجارب مماثلة فى الماضى وبأنهم يعتقدون أن تصميم التجربة الذى أجراه كلاوزر قد يستحق الجهد. وكان جون بل – بالأخص – متحمساً. فقد كانت المرة الأولى التى يكتب له فيها أى شخص رداً على ورقته أو فرضيته. وكتب جون بل إلى كلوزر[٢٨] قائلاً :

"فى ضوء النجاح الذى أحرزته ميكانيكا الكم بوجه عام، فإنه من العسير جداً بالنسبة إلى الشك فى نتيجة تجربة كهذه. ومع ذلك، لعلى أفضل إجراء هذه التجارب، التى تعتمد مباشرة على مفاهيمها الحاسمة، واستخراج نتائجها فى عمل غير مسبوق.

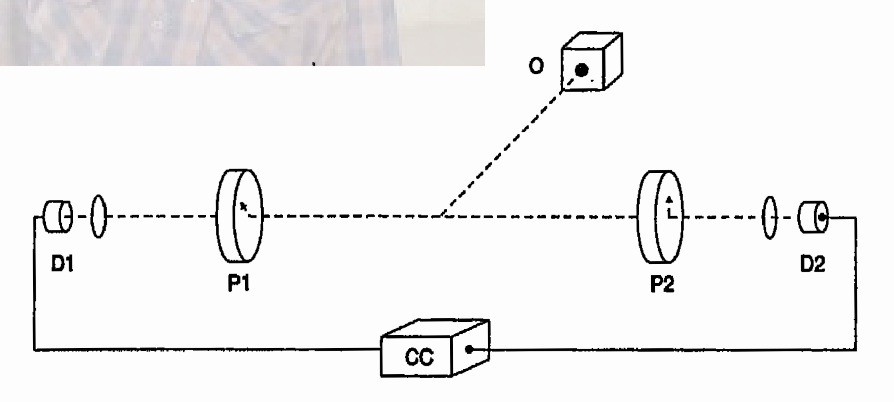
أكثر من هذا، ثمة دائمًا فرصة ضئيلة لنتيجة غير متوقعة، قد تكون سببا فى هز العالم!".

وكما سنرى، هناك أيضًا عملية معقدة تسمى مقايضة التعالق Entanglement Swapping ، وفيها يتبادل جسيمان متعالقان رفيقيهما. بمعنى ما، فإن هذا ما حدث لهؤلاء الأشخاص فى هذه الدراما العلمية العظيمة التى جرت أحداثها عبر الولايات المتحدة فى عام ١٩٦٩، فقد تعالق شيمونى وهورن مع هولت، الذى كان ماضيا فى طريقه لإجراء تجربة تستند على مواصفاتهما. وعندما اطلعا على البحث الذى يقوم به كلاوزر، استخدما حقيقة أن هولت كان على وشك إجراء تجربتهما. ونتيجة لذلك، فقد تعالق كلاوزر معهم. وابتكر العلماء الأربعة ورقة CHSH الرائعة التى تقترح تجربة مهمة، أما ريتشارد هولت فقد فك تعالقه مع الآخرين ومضى لإجراء تجربته الخاصة. وربما كان هذا هو السبب أنه حين استعاد ذكرى العلاقات بينهم عقب ذلك بسنوات عديدة، ذكر كلاوزر كلا من هورن وشيمونى فقط، لكن لم يذكر هولت.

وتواصل العمل على إجراء التجارب التى سبق تقديمها. وبدافع حماس جون بل ودعم وتعاون أصدقائه الجدد فى بوسطن، أصبحت العوامل كلها مشجعة لكلاوزر فى بحوثه. هل سيتم انتهاك متباينات جون بل فى البرهنة على نظرية الكم، أو سينتصر أينشتين وزميلاه وتصبح واقعية الموضع هى الحل؟ ولاعتقاد كلاوزر فى أينشتين وواقعية الموضع دخل فى رهان مع ياكير أهارونوف من جامعة Technion بحيفا، بنسبة اثنين إلى واحد ضد نظرية الكم، أما شيمونى فقد التزم الحياد، وانتظر ليرى أى نظرية هى الصحيحة. كان هورن يعتقد أن ميكانيكا الكم سوف تنتصر. واعتمد فى ذلك على حقيقة أن نظرية الكم حققت نجاحا كبيرًا فى الماضى: فلم يحدث أبدًا أن أخفقت فى التوصل إلى تنبؤات بالغة الدقة فى كثير من المواقف المختلفة.

وأنشأ كلاوزر وفريدمان مصدرا للفوتونات يتم من خلاله إثارة ذرات الكالسيوم إلى حالات أعلى. وفى العادة، ما أن يهبط الإلكترون فى ذرة الكالسيوم ليعود إلى مستواه المعتاد، ينطلق منه فوتون وحيد. غير أن ثمة احتمالا ضئيلاً أن يسفر ذلك عن

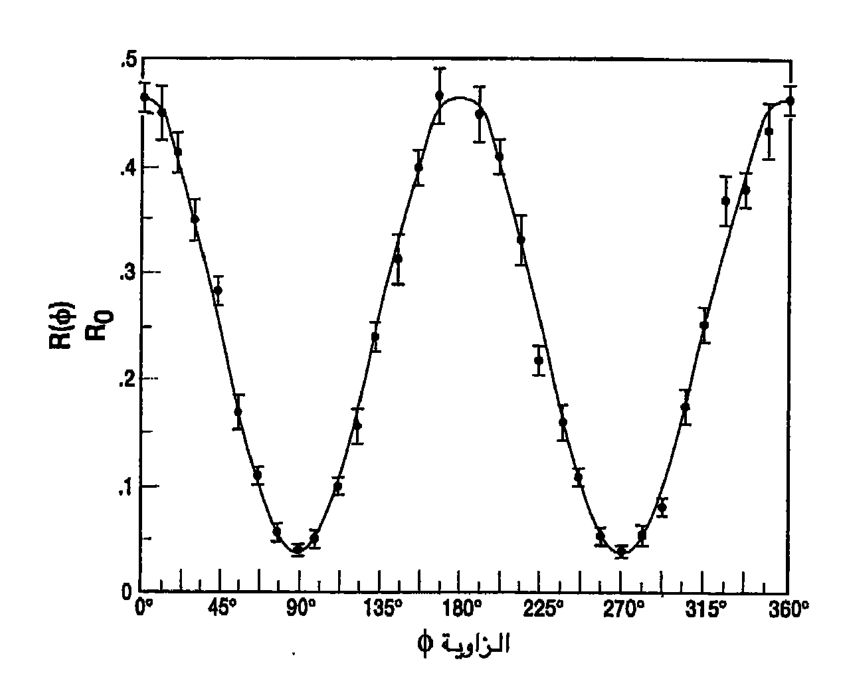
انطلاق فوتونين، أحدهما أخضر اللون والثانى بنفسجى، وكلٌ من الفوتون الأخضر والبنفسجى الناتجان بهذه الطريقة يرتبطان أحدهما بالآخر. والشكل التالى يوضح تصميم التجربة التى استخدمها كلاوزر وفريدمان. ويتم من خلالها توجيه أزواج الفوتونات الناجمة عن الشلال الذرى إلى المستقطب p1 ، والمستقطب p2 الموضوعين بزوايا مختلفة، ثم يتم الكشف عن الفوتونات التى مرت على المستقطبين بواسطة كشافين D1 ، D2 ، وفى نهاية المطاف تصل إلى عداد التزامن Coincidence Counter (CC) ليسجل النتائج :



كانت الإشارة الضوئية المستخدمة فى التجربة ضعيفة، وكان ثمة شلالات زائفة عديدة ينتج عنها فوتونات غير مرتبطة. وفى واقع الأمر، كان من بين كل مليون زوج من الفوتونات يتم الكشف فقط عن زوج واحد فى تزامن. وأخيرًا، كان يطلق على هذا الخلل "فتحة الكشف" [detection loophole] ، وكان يتعين حل هذه المشكلة. وبسبب هذا الحساب المحدود، أمضى كلاوز وفريدمان أكثر من ٢٠٠ ساعة من العمل التجريبى للحصول على نتيجة ذات مغزى. إلا أن نتائجهم الأخيرة جاءت داعمًا قويًا لنظرية الكم، ولم تكن فى صف نظريتى واقعية الموضع والمتغيرات الخافية لأينشتين. وكانت نتائج كلاوزر وفريدمان ذات دلالة بارزة إحصائيًا. ووجهت ميكانيكا الكم ضربة للمتغيرات

الخافية من خلال أكثر من خمسة انحرافات معيارية. بمعنى، اتفقت قيمة S المقاسة (المقدار المستخدم فى متباينة جون بل) مع تنبؤات ميكانيكا الكم وكانت أكبر من الحد ٢، المسموح به فى المتباينة، بمقدار خمسة أضعاف قيمة الانحراف المعيارى للبيانات التجريبية.

وقد وفرت تجربة كلاوزر – فريدمان أول تأكيد حاسم بأن ميكانيكا الكم ليست موضعية من الناحية الأساسية. ولقيت واقعية أينشتين حتفها – إذ باتت ميكانيكا الكم لا تتضمن أى "متغيرات خافية". وأتاحت التجربة حصول فريدمان على شهادة الدكتوراه. ونشر كلاوزر وفريدمان نتائج تجربتهما عام ١٩٧٢ ، والشكل التالى يوضح النتائج التى حصلا عليها.



إلا أن تجارب كلاوزر - فريدمان تركت بعض الأسئلة بلا إجابة. وعلى نحو خاص، تصميم التجربة الذى أنتج عدداً متزايداً من الفوتونات غير الخاضعة للملاحظة، والتى كان يلزم توليدها للحصول على الأزواج المتعالقة. أيضاً، كانت أجهزة الكشف المستخدمة محدودة الفاعلية. ومن ثم أثير تساؤل حول ما اذا كانت الفاعلية المحدودة والعدد الهائل من الفوتونات غير الخاضعة للملاحظة قد أثرت فى النتائج. كان كلاوزر وفريدمان قد أديا خدمة جليلة؛ قدما أوضح دليل على صحة ميكانيكا الكم فى مواجهة المتغيرات الخافية. وقد حققا هذه النتائج باستخدام أفضل تكنولوجيا متاحة، إلا أن هذه التكنولوجيا لم تبلغ حد الكمال. والمثير للسخرية، أنه حين كان كلاوزر يعمل فى مشروع ما بعد الدكتوراه تحت إشراف تاونس، الذى اكتشف أشعة الليزر، لم يتمكن كلاوزر من استخدام الليزر فى تجربته مع فريدمان لأنه لم يكن يعرف آنذاك كيف يستخدمها. ولعل أشعة الليزر كانت ستساعده هو وفريدمان بتمكينهما من إنتاج أزواج من الفوتونات المتعالقة بسرعة أكبر.

بالعودة إلى هارفارد، فقد تمكن هولت وبيبكين أيضا فى الوقت نفسه من الحصول على نتائج. إلا أنها كانت متطابقة مع أينشتين وواقعية الموضع والمتغيرات الخافية، وضد نظرية الكم. ونظراً لأن هولت وبيبكين كانا يعتقدان فى صحة نظرية الكم، فقد قررا عدم نشر نتائجهما. وبدلاً من ذلك، انتظرا ببساطة أن ينشر فريق بيركلى نتائجه، لينظرا فيما توصلوا إليه.

وقد استخدمت تجربة هولت وبيبكين فى هارفارد أحد نظائر الزئبق (الزئبق - ٢٠٠)، الذى ينتج عنه شلال مماثل عند قذفه بتيار من الالكترونات. واستمرت تجربتهما ١٥٠ ساعة، لأنها، أيضاً ، عانت من كثير من الفوتونات الشاردة. وبعد معرفتهما لنتائج تجربة كلاوزر فريدمان، قرر هولت وبيبكين ألا يواصلا العمل أو ينشرا نتائجهما المضادة فى أى مجلة. وبدلاً من ذلك، وزعا فى عام ١٩٧٣، نسخا أولية غير رسمية لنتائج تجربتهما على الفيزيائيين الآخرين. وفى النهاية، بعد أن توصل آخرون أيضاً إلى نتائج تجريبية تدعم ميكانيكا الكم، استنتج هولت وبيبكين أن تجربتهما شابتها أخطاء منهجية من نوع ما.

ورغم أن جون كلاوزر كان لا يعمل حينذاك فى علم الفلك الإشعاعى مع تشارلز تاونس الشهير، فقد نجح فى البقاء ببيركلى عضواً فى مجموعة الأشعة الذرية atomic - beams التى يرأسها هاوارد شوجارت، وأتاح له هذا أن يواصل عمله. وقرر كلاوزر، التجريبى المثابر دائمًا، أن يعيد تمحيص نتائج منافسيه ويحاول تكرارها. وانتابته الحيرة من نتائجهما المضادة، وأراد أن يكتشف أسباب عدم الاتفاق معهما. وأجرى تعديلات ثانوية فقط على تجهيزات التجربة التى استخدمها هولت وبابكين واستخدم نظيرا آخر للزئبق هو الزئبق ٢٠٢ لإنتاج الشلال الذرى. ومرة أخرى جاءت نتائجه، التى سجلها فى عام ١٩٧٦، فى اتفاق مع نظرية الكم ومضادة لنظريات المتغيرات الخافية الموضعية.

وفى العام نفسه، فى جامعة تكساس إيه آند ام، أجرى إد. اس. فراى Ed s. Fry وراندال طومسون Randal C. Thompson تجربة باستخدام الزئبق ٢٠٠، لكنهما أدخلا تحسينات كبيرة على تصميمات التجربة. ونظراً لأن فراى وطومسون استخدما أشعة ليزر فى إثارة الذرات، فقد جاءت الإشارة الضوئية الناتجة أكبر كثيراً فى قوتها مقارنة بالإشارات التى تحققت على يد التجريبيين الذين أجروا أبحاثا مشابهة قبلهم. واستطاع فراى وطومسون الحصول على نتائجهما فى ٨٠ دقيقة فقط هى زمن التجربة. وجاءت هذه النتائج لتدعم ميكانيكا الكم وتناقض افتراضات المتغيرات الخافية.

وفى عام ١٩٧٨، كان أبنر شيمونى بجامعة جنيف فى سويسرا. وخلال تلك السنة، كتب أبنر وجون كلاوزر ورقة مشتركة حول التعالق، وقاما بتنقيح النقاط التى احتوت عليها الورقة عبر الهاتف الدولى، حيث استعرضت الورقة كل ما كان معلومًا وقتذاك بشان هذه الظاهرة المحيرة. وناقشت الورقة بعمق كل النتائج التجريبية الخاصة بالتعالق التى تحققت حتى تلك السنة وخلُصت من ذلك إلى أنها ظاهرة حقيقية. وفضلاً عن التجارب التى أوردتها الورقة، كانت هناك نتائج عن فرضية جون بل أجرى تجاربها ثلاث مجموعات أخرى خلال سبعينيات القرن العشرين.

من هذه المجموعات، واحدة قادها فاراتشى G. Faraci من جامعة كاتانيا Catania بإيطاليا. وهذه المجموعة، التى نشرت نتائجها عام ١٩٧٤، استخدمت فوتونات عالية الطاقة (أشعة جاما) ناتجة عن تدمير بوزيترونى (أى عندما يدمر الكترون وبوزيترون بعضهما البعض). وكانت كل من تجربة هورن - شيمونى، وتجربة كلاوزر تشترطان عدم إجراء تجربة جون بل باستخدام أزواج من الفوتونات ناجمة عن التدمير البوزيترونى، بيد أن مجموعة كاتانيا استطاعت الاستفادة من بيانات ناجمة عن هذا النوع من التجارب بإضافة فروض تكنيكية مشابهة لفرض كاسداى، وأولمان، ووو. وكانت الشكوك حول هذا الفرض هى المسئولة عن الإهمال النسبى لهذه النتائج التجريبية.

كما استخدمت مجموعة أخرى - تألفت من كاسداى، وأولمان، ووو، بجامعة كولومبيا، وصدرت ورقتها عام ١٩٧٥ - الفوتونات الناجمة عن التدمير البوزيترونى. وفى عام ١٩٧٦، استخدم كل من "لاميهى - راشتى Lamehi - Rachti ، وميتيج w. Mittig من مركز صقلية للبحوث النووية Sicily Nuclear Research Center - أزواجًا مرتبطة من البروتونات فى الحالة الأدنى. واتفقت نتائج هذه المجموعات مع نظرية الكم وعارضت بديلها نظرية المتغيرات الخافية.

وفى أعقاب النجاحات التى أثبتت صحة نظرية الكم، أجريت أيضًا تعديلات على معالجات نظرية أخرى وهذا أمر معتاد فى العلوم: ما أن تتقدم النظرية، لا تبتعد التجارب خلفها كثيرًا، وعندما تتقدم التجارب، تعقبها النظرية التى تشرحها. وحين يتقدم شخص إلى الأمام، لا يكون الآخر وراءه بمسافة بعيدة، وبمجرد أن يلحق به يغدو عاملاً فى تقويته ودعمه. فقد ساعد كل من جون بل، وكلاوزر وهورن فى بث القوة للمجالات النظرية فى اختبار صحة واقعية الموضع لأينشتين. وبرهنوا على صحة متباينة قابلة للاختبار، باستخدام افتراض نظرية عشوائية (محكومة بالاحتمال) بدلاً من نظرية المتغيرات الخافية الحتمية. وهذه التطورات المتقدمة المتوازية فى الفيزياء الأساسية ظلت تتمحور حول فرضية جون بل المتميزة، وجرتها إلى دائرة المناقشة، فقد لبث كل من كلاوزر، وهورن، وشيمونى طوال أعوام طويلة يتبادلون الرأى فى دأب مع جون بل.

بينما أدت كل التجارب التى أجريت فى سبعينيات القرن العشرين لإثبات مؤكد لنظرية الكم، فيما عدا نظرية واحدة فسوف تتبقى لعالم آخر، على الجانب الآخر من كوكبنا، حيث سيقدم اختباراً أفضل لمتباينة جون بل مستخدماً كلا من تكنولوجيا الليزر مع تصميم أدخل عليه تحسينات كبيرة ليغلق منفذا خطيراً وبالتالى يزودنا بإثبات أكثر اكتمالاً بالطبيعة الغامضة غير الموضعية للكون.

ومن أجل التوصل حقا إلى اختبار مزاعم أينشتين فى معارضة ميكانيكا الكم، يحتاج أى عالم أيضًا إلى أن يضع فى الاعتبار احتمالاً - وإن بدا بعيداً وخياليًا - بأنه، ربما، حدث تبادل على نحو ما للإشارات بين أجهزة تحليل الاستقطاب فى أطراف المعمل. وهذه المسألة سيتناولها آلان أسبكت.

على أن حلماً ظل يراود أبنر تمثل فى أن يستمع ذات مرة إلى محاضرة يلقيها آلان أسبكت Alain Aspect ، يتساءل فيها أسبكت عما إذا كان ثمة حساب (نظام للعد - خوارزم)(*) - إجراء آلى لاتخاذ قرار - يخص حالة معينة لجسيمين ويقرر إمكانية تعالقهما من عدمه. ووجه أبنر هذا السؤال عبر واين ميرفولد Wayne Myrfold ، وهو خبير فى حوسبة ميكانيكا الكم، وكان قد نال فى التو الموافقة على قبول أطروحته للدكتوراه من قسم الفلسفة بجامعة بوسطن. وفى غضون أسبوعين، توصل ميرفولد إلى حل المشكلة. وجاء رده على سؤال أسبكت عن حلم شيمونى بأنه من غير الممكن رياضيا أن يوجد خوارزم كهذا.

(*) الخوارزم : مجموعة تعليمات أو خطوات توفر طريقة لحل مسألة أو مشكلة أو التوصل إلى نتيجة، والكلمة مشتقة من اسم الخوارزمى عالم الرياضيات العربى . (المراجع)


محمد خطاب



الفصل الخامس عشر

آلان أسبكت

"كان لدى بوهر شعور حدسي بأن موقف أينشتين، عندما يؤخذ بجدية، سوف يتعارض مع ميكانيكا الكم. إلا أن فرضية جون بل هي التي جسدت ماديا هذا التعارض".

آلان أسبكت

ولد آلان أسبكت عام ١٩٤٧ في قرية صغيرة جنوب غربي فرنسا، لا تبعد كثيراً عن بوردو وبريجورد Perigord ، في منطقة يعتبر فيها الغذاء الجيد والخمور الممتازة جزءًا مكملاً للثقافة. وحتى يومنا هذا، يصنع أسبكت فطائره المحشوة باللحم والسمك (الباتيه) ويحافظ على قلبه عفيا باحتساء الأنبذة الحمراء التي تشتهر بها المنطقة. ويرى أسبكت نفسه بوصفه برهانا حيا على ما أصبح يعرف بـ "التعارض الفرنسي": وهي حقيقة أن الفرنسيين يستطيعون تناول الأطعمة الدسمة ويتمتعون في الوقت نفسه بدورة دموية جيدة وسليمة صحيا من خلال احتسائهم النبيذ الأحمر بانتظام.

ومنذ الطفولة المبكرة، اهتم آلان بالعلوم، خاصة الفيزياء والفلك، وأحب النظر إلى النجوم، وقراءة كتب جول فيرن Jules Vernes ، واستمتع بالذات بكتابه "عشرون ألف فرسخ تحت الماء" ودائما كان يعلم أنه سيصبح عالمًا.

وانتقل آلان إلى أقرب مدينة له ليذهب إلى المدرسة، وبعد انتهائه من المدرسة الثانوية انتقل إلى مدينة أكبر، وهي بوردو، ليستعد لامتحانات القبول بأفضل مدارس

فرنسا وهى جراند إيكول الشهيرة. ونجح فى اجتياز امتحانات القبول. وانتقل إلى أكبر المدن جميعًا، باريس، القلب الثقافى والأكاديمى لأوروبا كلها. وفى عمر الرابعة والعشرين حاز شهادة التخرج التى أسماها "الدكتوراه الصغرى له"، وقبل أن يواصل الدراسة من أجل "الدكتواره الكبرى"، انقطع لعدة سنوات، وتطوع لينضم للخدمة الاجتماعية فى أفريقيا. وهكذا طار عام ١٩٧١ إلى الكاميرون.

وعلى مدى ثلاث سنوات، تحت شمس أفريقيا اللاهبة، انهمك آلان أسبكت فى عمل شاق لمساعدة الناس على العيش حياة أفضل فى ظل ظروف معاكسة. إلا أنه كان يقضى كل وقت فراغه يقرأ ويدرس واحداً من أكمل وأعمق الكتب الدراسية المؤلفة عن نظرية الكم على الإطلاق وهو Quantum Mechanics الذى شارك فى تأليفه Cohen - Tamoudji و Diu ، و Laloe . وانغمس آلان فى دراسة الفيزياء الغريبة للجسيمات الدقيقة. وأثناء عمله للحصول على الشهادة، قام بدراسة ميكانيكا الكم، إلا أنه لم يتمكن قط من فهم الفيزياء فهما جيداً، لأن المقررات التى درسها كانت تؤكد فحسب على حساب المعادلات التفاضلية وغيرها من الآليات الرياضية المستخدمة فى الفيزياء المتطورة. وهنا، فى قلب أفريقيا، أصبحت المفاهيم الفيزيائية نفسها مفاهيم واقعية للعالم الشاب. وبدأ أسبكت يفهم بعضا من سحر الكوانتم الذى يتخلل عالم الجسيمات الدقيقة. لكن من بين كل المظاهر الغريبة لنظرية الكم، زاد انجذابه إلى واحد منها أكثر من باقى المظاهر. إنه الفرض الذى طرحه أينشتين منذ عقود مع زميليه بودولسكى وروسين، وقد اتخذ معنى خاصا لديه.

وقرأ أسبكت الورقة التى قدمها جون بل، الذى كان آنذاك فيزيائيًا مغموراً فى المركز الأوروبى للبحوث النووية فى جنيف (CERN) . وأثرت الورقة فى أسبكت بعمق، إذ حثته على أن يقرر تكريس كل جهوده لدراسة المضامين غير المتوقعة لفرضية جون بل اللافتة للنظر بغرابتها. وقد أدى به هذا إلى اتخاذ طريق اكتشاف أكثر الأسرار عمقا فى الطبيعة. وفى هذا الإطار، يتشابه آلان أسبكت مع أبنر شيمونى. إذ إن كلا الرجلين يمتلك إدراكًا عميقًا – بل وحتى طبيعيا وحدسيا – لنظرية الكم. والرجلان

كلاهما، عبر الأطلنطى الذى يفصل بينهما بشاطئيه ، كان لديه على نحو ما قدرة شاركا فيها جون بل فى فهم الحقائق التى كانت عصية على إدراك أينشتين.

ومثل شيمونى، دائمًا ما كان يمضى آلان أسبكت إلى جوهر أى مفهوم أو موضوع. فإذا أراد أن يفهم التعالق، يقرأ ما كتبه شرودنجر مباشرة - وليس تحليلا يعرضه فيزيائى آخر بعده. وإذا رغب فى فهم اعتراضات أينشتين على نظرية الكم الوليدة، يبحث عن الأوراق الأصلية لأينشتين فى عشرينيات وثلاثينيات القرن العشرين ويقرؤها. غير أن المثير للدهشة، بخلاف حقيقة أن شيمونى راوده حلم رأى خلاله أسبكت يقدم عرضا أدى بتطوير شيمونى لمسألة مهمة، فإن حياة الرجلين لم تتعالقا. فقد تحركا غالبًا فى دوائر تكاد تكون منفصلة. ففى حين كان أبنر شيمونى متحمسا، والذى كان حماسه للفيزياء يطغى على من حوله: مثل هورن، وكلوزر، وجرينبرجر، وزاينجلر، يستحثهم للمضى فى طريق اكتشاف ما هو أعظم وإنجازه - كان أسبكت يعمل على نحو مختلف.

وبمجرد عودته من أفريقيا، كرس آلان أسبكت جهوده، لدراسة دقيقة لنظرية الكم فى بلده الأصلى. وفى الواقع كانت فرنسا - ومازالت - مركزا عالميًا مهمًا للفيزياء. ووجد نفسه فى قلب نخبة من الفيزيائيين ذوى الشأن، تعلم منهم الكثير، ومن خلالهم تمكن من اختبار أفكاره. وتضم قائمة أسماء أعضاء الكلية المسجلين فى لجنة أطروحته التى نقرأها ضمن Who's Who فى العلوم الفرنسية أسماء مثل مارشال A.marechal ، الحاصل على جائزة نوبل ، وكوهين - تانودجى، وإسبانيه B. D' Espagnat ، وإمبير C.Imbert ، ولالو F.laloe . والعضو الوحيد غير الفرنسى باللجنة لم يكن سوى جون بل نفسه.

وكما حدث مع شيمونى فى الضفة الأخرى من الأطلنطى، فقد فهم أسبكت فرضية جون بل على نحو أفضل من معظم الفيزيائيين. وسرعان ما أدرك التحدى الذى ضخته فرضية جون بل المتميزة فى الفيزياء وفهمه وكذلك تحدى الفرضية لفهم أينشتين للعلم. ومن وجهة نظر أسبكت: إن جوهر الجدال بين بوهر وأينشتين كان إيمان أينشتين الراسخ بأنه :

"ينبغى علينا التخلى عن واحد من الزعمين التاليين :

١ - إن الوصف الإحصائى للدالة الموجية هو وصف كامل، أو

٢ - إن الحالات الفعلية لجسيمين منفصلين مكانيا مستقلة أحداها عن الأخرى"(٣٩).

وبسرعة بالغة أدرك أسبكت أن هذا التأكيد الذى عرضه أينشتين، كما ورد فى ورقة EPR عام ١٩٣٥، هو الذى تناولته فرضية جون بل ببراعة وإحكام. وباستخدام تجهيزات EPR ، قدم جون بل إطارا فعليا لاختبار الفرضية القائلة بأن نظرية الكم غير كاملة فى مقابل الزعم القائل بأنها، حقا، نظرية كاملة لكنها تتضمن عناصر لاموضعية واضحة المعالم.

وتختص فرضية جون بل بفئة شديدة العمومية من النظريات الموضعية مع مؤشرات (Parameters) خافية، أو متممة. وهذا الافتراض يتمثل على النحو التالى: لنفرض أن نظرية الكم غير كاملة، غير أن أفكار أينشتين عن الموضع باقية. لذلك نفترض أنه ينبغى إيجاد طريقة لاستكمال الوصف الكمى للعالم، مع الإبقاء على شرط أينشتين الأساسى بأن ما يحدث هنا لا يمكن أن يؤثر فيما يحدث هناك، إلا إذا أمكن إرسال إشارة من هنا إلى هناك (وهذه الاشارة، حسب النظرية النسبية الخاصة لأينشتين، لا يمكن أن تسير بسرعة أكبر من سرعة الضوء). وفى هذه الحالة، لتكون النظرية كاملة ينبغى اكتشاف المتغيرات الخافية، وتقديم وصف لهذه المتغيرات التى تجعل الجسيمات الدقيقة أو الفوتونات تتصرف بطريقة معينة. ويكمن حدس أينشين فى أن معاملات الارتباط بين الجسيمات التى تفصل بينها مسافة تنجم عن حقيقة أن تجهيزاتها المشتركة تمنحها متغيرات خافية لا يتضح تأثيرها إلا إذا تشاركت فى الموضع. وتكون هذه المتغيرات الخافية صفحات تحتوى على تعليمات، والجسيمات التى تتبع التعليمات، بدون أى معاملات ارتباط مباشرة بين الجسيمات، تضمن أن يكون سلوكها مترابطا. وإذا كان الكون موضعيا فى طبيعته (بمعنى أنه لا يوجد ثمة احتمال لاتصال أو تأثير أسرع من الضوء، أى أن العالم هو كما يراه أينشتين) إذن فإن المعلومات اللازمة

لاستكمال نظرية الكم يجب الحصول عليها من خلال نوع معين من المتغيرات الخافية التى سبق برمجتها.

ويتضمن إثبات جون بل أن أى نظرية عن المتغيرات الخافية لن تتمكن من إعادة إنتاج كل تنبؤات ميكانيكا الكم، خاصة التفسيرات المتعلقة بالتعالق فى شرح بوهم لورقة EPR . وتجلى الخلاف بين نظرية الكم الكاملة وكون المتغيرات الخافية الموضعية فى شكله الصدامى من خلال متباينة جون بل.

وتوصل آلان أسبكت إلى فهم نقطة جوهرية. كان قد أدرك أن نظرية الكم قد حظيت آنذاك بنجاح هائل كأداة للتنبؤ العلمى. ولذلك انتابه شعور أن النزاع الواضح المعروض مسبقًا والمتأصل فى فرضية جون بل ومتبايناته المصاحبة يمكن استخدامه، فى المقابل، لهزيمة كل النظريات الداعمة للمتغيرات الخافية الموضعية. ولذلك، وبخلاف جون كلاوزر - والذى راهن قبل أن يجرى تجربته على أن نظرية الكم سوف تمنى بالهزيمة وأن فكرة الموضع سوف تنتصر. ذات يوم اتجه أسبكت لتصيم تجاريه الخاصة مؤمنا بانتصار نظرية الكم وهزيمة نظرية الموضع. فإذا تعين أن تنجح تجاربه التأملية، فإن فكرة اللاموضع ستتأسس بوصفها ظاهرة واقعية فى عالم الكوانتم، وسوف تصد نظرية الكم الهجوم على عدم اكتمالها. والجدير بالملاحظة، مع هذا، أنه أيا ما كانت ميول كلاوزر وأسبكت حول النتائج المتوقعة لتجاربهما، فإن كلا منهما صمم تجربة تسمح للطبيعة أن تتكلم دون أى انحياز مسبق لاتجاه أو لغيره.

وكان أسبكت واعيا تماما بأن فرضية جون بل، التى ووجهت فعليا بالتجاهل إبان ظهورها لأول مرة فى منتصف ستينيات القرن العشرين، غدت أداة لسبر غور أسس نظرية الكم. وعلى نحو خاص، حين نما إلى علمه تجارب كلاوزر فى كاليفورنيا وما أجراه شيمونى وهورن فى بوسطن. كما عرف أن تجارب أخرى عديدة أجريت ولم تسفر عن نتائج حاسمة. وأدرك أسبكت - كما أورد فيما بعد في أطروحته للدكتوراه وفى الأوراق التى تلتها - أن التجهيزات التجريبية التى استخدمها الفيزيائيون فى أعمالهم السابقة عليه كانت تعانى من صعوبات فى استخدامها. كذلك فإن أى خلل

أو شائبة فى تصميم التجربة قد ينحو بها إلى تدمير التركيب هش البناء الأمر الذى يؤدى للخلاف المرغوب بين متباينات جون بل وتنبؤات نظرية الكم.

كان التجريبيون يتطلعون لنتائج تواجه معاناة شديدة فى الحصول عليها. وكان السبب يكمن فى أن التعالق يحتاج إلى شروط صعبة للتحقق، والاستمرار، والقياس بفعالية. ومن أجل البرهنة على انتهاك لمتباينة جون بل، التى تساعد فى البرهنة على تنبؤات نظرية الكم، يتعين بناء التصميم التجريبى بمنتهى الدقة. واستهدف أسبكت أن يعد تجهيزات التجربة على أعلى درجة من الكفاءة، الأمر الذى يتيح له، كما كان يأمل، أن يعيد إثبات تفسير بوهم للتجربة الفكرية لورقة EPR لأقرب درجة ممكنة، وأن تتيح له قياس معامل الارتباط فى البيانات التى تتنبأ فيها ميكانيكا الكم بانتهاك متباينات جون بل.

وتهيأ أسبكت للعمل. وقام بإنشاء كل قطعة فى الجهاز بمعرفته، متخذا من بدروم مركز البحوث البصرية بجامعة باريس مقرا لعمله، كى يتمكن من الحصول على أى عون فى مكان التجربة وفى تجهيزاتها. وأنشأ مصدره لإنتاج الفوتونات المترابطة، وجهز أنظمة المرايا، وأجهزة تحليل الاستقطاب والكواشف. ووضع أسبكت فى اعتباره جيداً تجربة EPR الفكرية. وفى الورقة المعدلة المقدمة من دافيد بوهم وكذلك من تطبيقات فرضية جون بل يتضح بساطة الظاهرة موضع البحث: إن الحركة الدورانية لجسيمين واستقطابهما مترابطان. وفى المقابل كان إطار كمية الحركة والموضع لدى أينشتين أكثر تعقيداً، لأن كل واحدة من هاتين الكميتين تأخذ قيما متصلة ولا يمكن تطبيق فرضية جون بل تطبيقًا مباشراً. وبعد التفكير فى المسألة لفترة طويلة، توصل آلان أسبكت إلى استنتاج أن الوسيلة الأفضل لاختبار لغز EPR تكمن فى استعمال فوتونات الضوء. وهو نفس ما حدث فى التجارب السابقة التى حققت أفضل النتائج.

وكانت الفكرة – وهى نفس ما اتبعه فى السابق كلاوزر وفريدمان، فضلا عن زملائهما فى بوسطن شيمونى وهورن وهولت – هى قياس استقطاب الفوتونات المنبعثة فى أزواج مترابطة، وكان أسبكت يعلم بإجراء عدد من التجارب من هذا النوع فى

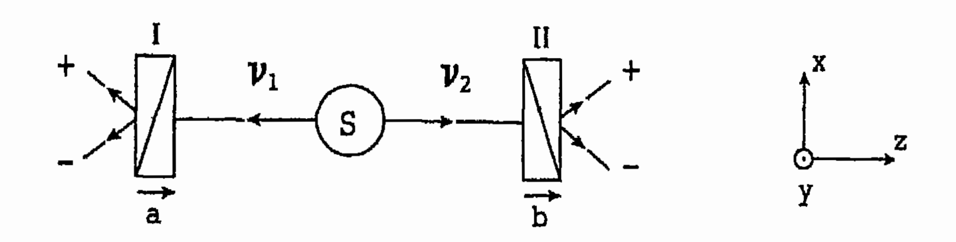
الولايات المتحدة بين عامى ١٩٧٢، ١٩٧٦ . وأحدث هذه التجارب التى أسفرت عن نتائج تدعم ميكانيكا الكم أجراها فراى وطومسون، وقد تمت باستخدام أشعة الليزر لاستثارة الذرات.

وقرر أسبكت إجراء ثلاث تجارب أساسية متتالية. الأولى تكونت من جهاز يحتوى على أنبوبة واحدة يهدف إلى مضاعفة نتائج سابقيه بطريقة أكثر دقة وإقناعا بكثير. واستخدم شلال الكالسيوم المشع نفسه، حيث تطلق ذراته المستثارة الفوتونات فى أزواج مترابطة. وترتب على ذلك إجراء تجربة أخرى باستخدام أنبوبتين كما سبق وأجراها كل من كلاوزر وهورن فى محاولة لكى تكون أقرب إلى تجربة مثالية. فإذا كان تصميم الجهاز يحتوى على أنبوبة واحدة، فإن الفوتونات التى لن تدخلها قد يكون سلوكها ناجما عن واحد من السببين التاليين: إما أنها تصطدم بجهاز تحليل الاستقطاب لكن قطبيتها الخاطئة تمنعها من المرور، أو أنها ضلت الطريق إلى فتحة جهاز التحليل. وفى التجربة التى تحتوى على أنبوبتين، يمكن قصر الاهتمام على الجسيمات التى يتم الكشف عليها، فجميعها يتعين أن تصطدم بفتحة المدخل ويتم استثارتها داخل أنبوبة واحدة من الأنبوبتين. وتفيد هذه الطريقة فى زيادة قدرة الفتحة على الكشف. وفى النهاية أجرى أسبكت تجربة اقترحها بوهم وأهارونوف عام ١٩٥٧ وعرضها بالتفصيل جون بل. وفى هذه التجربة يتم ضبط اتجاه الاستقطاب لأجهزة التحليل بعد مغادرة الفوتونات لمصدرها وأثناء انطلاقها. وهذا نوع من التصميمات يلجأ إليه التجريبيون كرهان على الورقة الأخيرة. وبمعنى ما، يقول التجريبى: "ماذا يحدث إذا بعث فوتون أو جهاز تحليله رسالة إلى الفوتون الآخر أو إلى جهاز تحليله يبلغه فيها بالمحطة الأخرى لاتجاه محلل الاستقطاب، بحيث يستطيع الفوتون الثانى تعديل وضعه تبعا لذلك؟". وللحيلولة دون حدوث هذا النوع من تبادل المعلومات، يختار التجريبى نوع التوجيه المستخدم فى تصميم التجربة عشوائيًا وكذلك متأخرا. وهكذا، أضحى آلان أسبكت يسعى إلى إجراء اختبار أكثر تحديدا لمتباينة جون بل – اختبار لا تثير نتائجه شكوكا لدى أى شخص قد يرى أن أجهزة التحليل أو الفوتونات على صلة ببعضها البعض لتخدع من يجرى التجربة. لأنه حسب تفكير الفيزيائيين –

تجدر الملاحظة – إن الاتصال قد لا يكون بهذه الصورة الغريبة، وإن نية خداع التجريبى غائبة عن هذا النوع من التفكير. أما ما يثير قلق الفيزيائيين فهو حقيقة أنه فى النظام الفيزيائى الذى تتاح له فرصة الوصول إلى مستوى متوازن إلى حدٍ ما، فإن الاتصال من خلال الضوء أو الحرارة قد ينقل تأثيرات من جزء من النظام إلى جزء آخر.

وفى التجربة الفعلية، اضطر أسبكت إلى اللجوء إلى استخدام إشارة كانت تعمل دوريا، وليست عشوائية تمامًا – ومع ذلك، يتم إرسال الإشارة إلى أجهزة التحليل بعد انطلاق الفوتونات. وكان هذا هو العنصر الجديد المهم بشكل أساسى فى تجاربه.

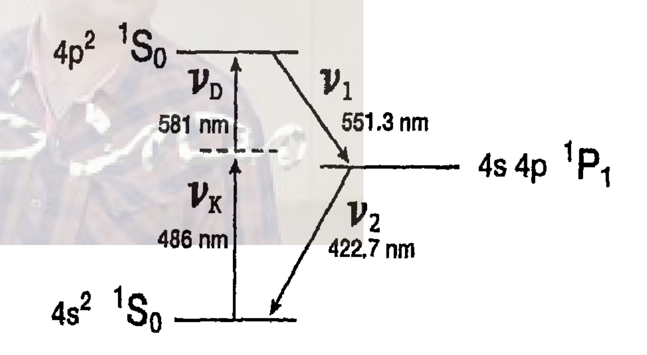
والشكل التالى يوضح جهاز أسبكت ذى الأنبوبتين، لكنه لا يعمل بمفتاح [أعيد طبع الشكل بتصريح من أطروحته للدكتوراه].



ونظرًا لأن آلان كان يعرف أن متباينة جون بل قد استخدمت فى السابق لتحديد أى بديل من البديلين: ميكانيكا الكم أو واقعية الموضع هو الصحيح، فقد ذهب إلى جنيف لزيارة جون بل، وأخبره أنه يخطط لتصميم تجربة، يدمج خلالها مبدأ ديناميكيا لأجهزة استقطاب متغيرة الزمن لاختبار أفكار أينشتين على نحو مستقل، حسب اقتراح جون بل نفسه فى ورقته. وتطلع إليه جون بل وسأله: "هل تتولى منصبًا جامعيا؟"، وأجابه أسبكت بأنه مازال طالبًا متخرجًا. وحدق فيه جون بل باستغراب، وتمتم: "لابد أنك طالب متخرج تتمتع بشجاعة كبيرة .."

وبدأ أسبكت تجاربه، واستخدم شعاعًا من ذرات الكالسيوم ليكون مصدره للفوتونات المترابطة. وتم استثارة الذرات بشعاع ليزر، وأدى هذا إلى صعود إلكترون

واحد من كل ذرة مستويين من الطاقة أعلى من حالته الساكنة (وهو ما حدث فى تجارب سابقة). وعند هبوط الإلكترون مستويين لأسفل، كان يبث أحيانا زوجين من الفوتونات المترابطة. والشكل التالى يوضح مستويات الطاقة والفوتونات المتعالقة الناتجة عن هذه الطريقة لشلال الذرات.



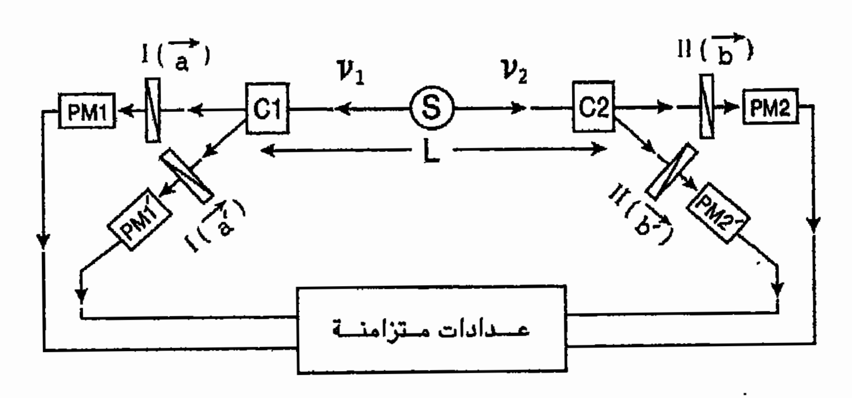
على أن معدل التزامن للتجربة، أى معدل الكشف والقياس للأزواج المترابطة فعليا، بلغ مقداراً أعلى بكثير مما حصل عليه السابقون على أسبكت. كما أن هذه التجارب التى يُستخدم فيها جهاز تحليل استقطاب بأنبوبة واحدة قد حققت نتائج ممتازة: فقد تم انتهاك متباينة جون بل بمقدار تسعة انحرافات معيارية. ويعنى هذا أن نظرية الكم لها الغلبة، إذ ليس ثمة احتمال لوجود متغيرات خافية، كما لم يُستدل على وجود اللاموضع لهذه الفوتونات المتعالقة، كما أن احتمال أن تكون هذه الاستنتاجات خاطئة كان احتمالا ضئيلا إلى حد بالغ. وكانت هذه النتيجة بالغة الفعالية. وعقب ذلك، أجرى أسبكت تجاربه على الجهاز ذى الأنبوبتين.

إذا أعيق الفوتون بواسطة جهاز تحليل الاستقطاب فى التجربة أحادية الأنبوبة، يُفقد هذا الفوتون، ولا توجد وسيلة لتحديد ما إذا كان مرتبطا بفوتون آخر وما هى نوعية هذا الارتباط. وهذا هو السبب فى استخدام التجربة ذات الأنبوبتين. وما يحدث فى هذه التجربة أنه إذا أعيق الفوتون بواسطة جهاز تحليل الاستقطاب، فإنه ينعكس وتبقى ثمة إمكانية لقياسه. وهذا الأمر يزيد من معدل التزامن للاختبار ككل،

ويؤدى إلى زيادة كبيرة فى دقة التجربة. ومع هذا التحسن الكبير فى نظام القياس، غدت النتائج التى حصل عليها أسبكت أكثر دقة وإقناعا. وتم انتهاك متباينة بل بأكثر من ١٤٠ انحرافا معيارياً. وتجلى على نحو ساحق الدليل لصالح ميكانيكا الكم، أما اللاموضع فقد أطيح به وبات بعيداً عن أى توقعات.

وهكذا حان موعد الاختبار النهائى للاموضع، وتمثل فى إمكانية استمرار فوتون مفرد فى إرسال إشارة لفوتون آخر، فى مواجهة بديل ذلك فى ميكانيكا الكم الذى يقول بأن اللاموضع له الغلبة، وبأن الفوتونات - بدون أن تكون قادرة على إرسال إشارات إلى بعضها البعض - تتفاعل أوضاع أحدهما مع أوضاع الآخر معا. وقام أسبكت بتصميم أجهزة تحليل استقطاب، يمكن تغيير اتجاهها فى الفراغ بسرعة كبيرة حتى أن هذا التغيير يحدث أثناء انطلاق زوج الفوتونات. وقد تحقق هذا على النحو التالى: تم وضع جهازى تحليل استقطاب باستخدام اتجاهات مختلفة على كل جانب من جانبى التجربة. ويتصل الجهازان بمفتاح واحد يمكنه بسرعة تحديد جهاز التحليل الذى سيتم إرسال الفوتون إليه، وبالتالى معرفة اتجاه الفوتون الذى ستتم ملاقاته من بين الاتجاهين المحتملين. وهذا الاختراع، فى الواقع، هو أعظم اكتشاف على الإطلاق فى تجارب أسبكت، والذى تم على نطاق واسع اعتباره الاختبار النهائى والأخير للاموضع.

والشكل التالى يوضح تجربة أسبكت الثالثة، ويوجد مفتاح بين أجهزة تحليل الاستقطاب فى حين يتم بث زوج الفوتونات.



وفى شرح تصميمه للنوع الثالث من تجاربه، استشهد أسبكت بجزء من نص مهم لجون بل: "إن عمليات تجهيز الأدوات تتم قبل إجراء التجربة بوقت كاف ليتاح لها أن تصل إلى نوع من التوافق المتبادل من خلال تبادل الإشارات فى سرعات أصغر من أو مساوية لسرعة الضوء". وفى شرط كهذا، فإن النتيجة على جهاز تحليل الاستقطاب I تعتمد على التوجيه عند b لجهاز تحليل الاستقطاب عن بُعْد II ، والعكس بالعكس. "وفى هذه الحالة، فإن شرط الموضع ليس له تأثير ولا يمكن اختباره". وهنا يتعين على العلماء أن يكونوا بالغى الحرص. إنهم يراهنون على الورقة الأخيرة، فلعل ثمة احتمال على تفاعل أجهزة تحليل الاستقطاب والفوتونات مع بعضها البعض وهو ما يسفر عن نتائج تتطابق مع واقعية الموضع. وعلى أية حال، عند تثبيت أجهزة تحليل الاستقطاب فى التجربة، فلا وجود لشرط الموضع وبالتالى- بأشد المعانى صرامة- من غير المحتمل اختبار فكرة EPR ، التى تشترط واقعية الموضع، وذلك فى مواجهة استخدام نظرية الكم لفرضية جون بل.

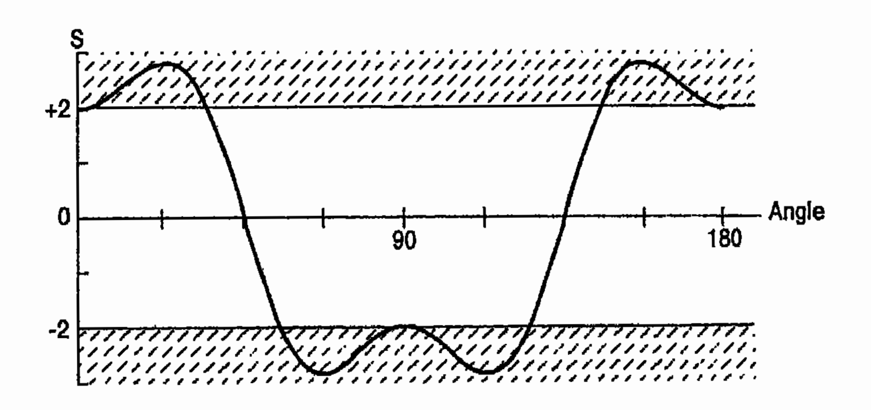
وفى المعمل الذى أجرى به أسبكت تجاربه، وضع كل جهاز تحليل استقطاب على مسافة ٦,٥ متر من المصدر. وبلغت المسافة الكلية بين جهازى التحليل كما هو مبين بالشكل السابق ١٣ مترا. ولذلك، من أجل حل المسألة وإتاحة الفرصة أمام إجراء اختبار موضوعى لـ "سببية أينشين"، بمعنى إجراء اختبار لا يمكن من خلاله للفوتونات وأجهزة تحليل الاستقطاب أن "تخدع التجريبى" عن طريق إرسال إشارات لبعضها البعض، لجأ أسبكت إلى تصميم أسلوب تجريبى لجهاز تحليل استقطاب (I) بمفتاح تحويل بين الجهازين a ، a' وجهاز التحليل II بين جزئيه b ، b فى فترة زمنية أصغر من ١٣ متراً مقسوماً على سرعة الضوء (البالغة ٣ × ١٠^٨ متر لكل ثانية)، وهذه الفترة الزمنية تساوى ٤,٣ × ١٠^-٨ ثانية (٤٣ نانو ثانية). وأمكن لأسبكت إنجاز هذا الهدف وإنشاء جهاز يستطيع أن يلبى احتياجات هذه السرعات الفائقة.

وفى التجهيزات المبينة بالشكل لتجربة أسبكت، تحققت إمكانيات غلق وفتح المفتاح فى زمن أقل من ٤٣ نانو ثانية. وقد تم ذلك عن طريق جهاز ضوئى - صوتى يتفاعل فيه الضوء مع موجة فوق صوتية مستقرة فى الماء. وعند تغيير الموجة فى إناء الماء الشفاف، ينحرف شعاع الضوء الساقط على الماء من جهاز إلى آخر. وفى الواقع تحدث عمليات

الغلق والفتح على فترات زمنية تتراوح بين ٦,٧ إلى ١٣,٣ نانو ثانية، وهى أقل كثيراً من الحد الأقصى ٤٣ نانو ثانية.

وأحرز أيضا التصميم الثالث لتجارب أسبكت نجاحا، ومرة أخرى جاءت الهزيمة من نصيب أفكار الموضع والمتغيرات الخافية لصالح ميكانيكا الكم. وقال أسبكت إنه كان يحبذ أن يكون لديه تجهيزات تجريبية من خلالها لا تتغير الأجهزة أثناء انطلاق الفوتونات فقط، بل أيضاً تتم عمليات الفتح والغلق عشوائيًا على نحو تام. إذ لم توفر تصميماته شروط العشوائية، بل كانت على الأرجح توفر تغييرا دوريًا للأوضاع. وهكذا، وكما أشار أنطون زايلنجر **Anton Zeilinger** فإن مجموعة ماهرة لأقصى حد من الفوتونات وأجهزة تحليل الاستقطاب – من الناحية الأساسية – "يمكنها أن تتعلم" النمط وتحاول أن تخدع التجريبى. وهذا، بالطبع، غير محتمل لأقصى حد. ومازالت التجربة الثالثة من سلسلة تجارب أسبكت تنطوى على مركّبة ديناميكية بالغة الأهمية، أضيفتْ قوة نتائجها الإيجابية جميعها لصالح ميكانيكا الكم، وأفادت فى وضع أساس التعالق اللاموضعى باعتباره ظاهرة حقيقية.

والشكل التالى يبين، فى المساحة المظللة، مناطق إخفاقات موضعية أينشتين من خلال التجارب.



وفى السنوات التالية، واصل أسبكت عمله فى مركز الضوء بجامعة باريس فى أورسيه Orsay ، واستمر يجرى تجارب مهمة أخرى تتعلق بفيزياء الكم. وعند استعادته لذكريات تجاربه الفذة حول التعالق فى ثمانينيات القرن العشرين يقول: "أشعر أيضًا بالفخر من حقيقة أنه، بالاضافة لإجراء التجارب، فإن عملى جذب الاهتمام بفرضية جون بل، وفى الوقت الذى أجريت فيه عملى، لم يكن هذا مجالا شائعًا".


محمد خطاب

الفصل السادس عشر

بنادق الليزر

" [يحدث التداخل بسبب] أن فوتونا يتعين أن يأتى من مصدر معين، ويأتى فوتون آخر من مصدر آخر، لكننا لا نعرف المصدر الذى أتى منه كل واحد منهما بالتحديد ".

ليونارد ماندل

فى أعقاب النجاح المدوىّ لتجارب أسبكت – التى بينت على نحو مؤكد (لأغلب عقول الفيزيائيين) حقيقة التعالق – تواصل باطراد دراسة هذه الظاهرة، وفى حين أن آلان أسبكت وزملاءه فى أورسيه، علاوة على الباحثين الذين أجروا تجارب سابقة، استخدموا طريقة شلال الذرات لإنتاج حالات متعالقة، وبعد الانتهاء من هذه التجارب مباشرة، وفى أوائل ثمانينيات القرن العشرين، بدأ علماء الفيزياء التجريبيون فى استخدام وسيلة جديدة. وهذه الطريقة، التى مازالت هى التكنيك المفضل لإنتاج فوتونات متعالقة فى الوقت الحالى، تسمى Spontaneous Parametric down - conversion التحويل لأدنى اللحظى البارامترى، ويطلق عليها اختصارا (SPDC) .

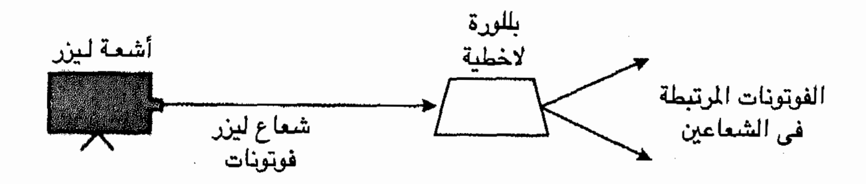
لنتخيل أن هناك بللورة شفافة موضوعة على منضدة، وأن شخصا ما يسقط ضوءاً على هذه البللورة. فى البداية، سنرى فحسب الضوء الذى يمر فى البللورة، وهو يضىء خارجا من الجانب الآخر، لكن مع زيادة الضوء الساقط، فجأة نرى تأثيراً

إضافيا: هالة باهتة تحيط بالبلورة، وبالنظر إليها عن قرب نلاحظ أن هذه الهالة الشاحبة تومض بجميع ألوان قوس قزح، وتنجم هذه الظاهرة الجميلة عن تأثير فيزيائى مهم، والثابت فى نهاية الأمر أنه فى حين أن معظم الضوء الساقط على البلورة ينفذ خلالها ليصل إلى الجهة المقابلة، فإن نسبة ضئيلة جداً من الضوء المار بالبلورة لا يسير فى خطوط مستقيمة. إذ إن هذه القلة من الفوتونات يحدث لها تحوّل عجيب: فالفوتون الذى لا يتخذ خطا مستقيما فى مساره خلال البلورة "ينقسم" إلى فوتونين، وكل فوتون ناجم عن هذه الطريقة يتفاعل مع الشبكة البلورية، على نحو ليس مفهوما تماما فى العلم، وهذا التفاعل يسفر عن زوج من الفوتونات. وما أن يحدث هذا التحول للفوتون، فإن مجموع تردُّدىْ الفوتونين الناتجين يساوى تردد الفوتون الأصلى. كما أن الفوتونات المزدوجة الناتجة عن هذه الطريقة تصبح متعالقة.

وفى طريقة التحويل لأدنى للحصول على فوتونات متعالقة، يستخدم العلماء شعاع ليزر من أجل "قذف" البلورة بالضوء، ويلزم أن تكون البلورات المستخدمة لهذا الغرض من نوع خاص يتمتع بخاصية توليد أزواج الفوتونات. والمستخدم فى هذا من بين أنواع البلورات يودات الليثيوم **Lithium Iodate** ، وبورات الباريوم **barium borate** . ويسمى هذا النوع من البلورات: البلورات اللاخطية. ويرجع السبب فى ذلك أنه عندما تستثار ذرات الشبكة البلورية، فإن الطاقة الناجمة التى تحدثها الشبكة يمكن التعبير عنها بواسطة معادلة تحتوى على حد لاخطى (مربع). وقد استخدم علماء الفيزياء طريقة التحويل لأدنى منذ عام ١٩٧٠ . إذ اكتشف فى تلك السنة كل من بيرنهام **D.C.Burnham** ، وواينبرج **D.L.Weinberg** هذه الظاهرة أثناء فحصهما لطبيعة الضوء الثانوى الناجم عن مرور شعاع ليزر قوى خلال بلورة لاخطية، وعلى نحو مفاجئ بدا أن البلورة "تستحم" فى ألوان باهتة لقوس قزح. واكتشف العالمان: أن معظم الضوء ينفذ من البلورة، إلا أن جزءاً من مائة بليون جزء من الفوتونات يتولد عنه زوج من الفوتونات، ونظراً لأن تردد كل فوتون من زوج الفوتونات الناتجة يضاف إلى قرينه ليساوى تردد

الفوتون المفرد الأصلى (بما يعنى أن كل فوتون منها انخفض تردده إلى النصف)، لذلك أطلق العلماء على هذه العملية التحول لأدنى. فكل فوتون انقسم تردده إلى ترددين حاصل مجموعها يساوى تردد الفوتون الأصلى. إلا أن الباحثين لم يصلوا إلى تأكيد بأن الفوتونين الحادثين بهذه الطريقة قد تعالقا فعليا، لكنهم قالوا بأنهم اكتشفوا وسيلة ذات قيمة لإنتاج الفوتونات المتعالقة. ولا يقتصر تعالق أزواج الفوتونات فقط فى حالة استقطابهما، بل يتعدى ذلك إلى التعالق فى الاتجاه أيضًا، وهو أمر ذو فائدة للدراسات التى تتضمن تداخل **interference** زوج من الفوتونات.

وقد لاحظ العلماء التجريبيون – فى مجال التعالق – الذين يستخدمون طريقة شلال الذرات القديمة، وجود فتحة تجميع فعالة **a collection efficiency loophole** . وينجم هذا التأثير عن الارتداد الذرى. فعندما ترتد الذرات، تُفقد بعض كمية الحركة من الاعتبار. لذلك فإن الزوايا التى تصنعها الفوتونات المتعالقة الناتجة لم تكن معروفة بدقة، مما يتعذر معه تحديد الاتجاه الذى يترافق فيه الفوتون مع فوتون آخر فى زوج متعالق. وتتميز طريقة التحويل لأدنى بأنها أكثر دقة بكثير. وفى الشكل التالى توضيح لها:

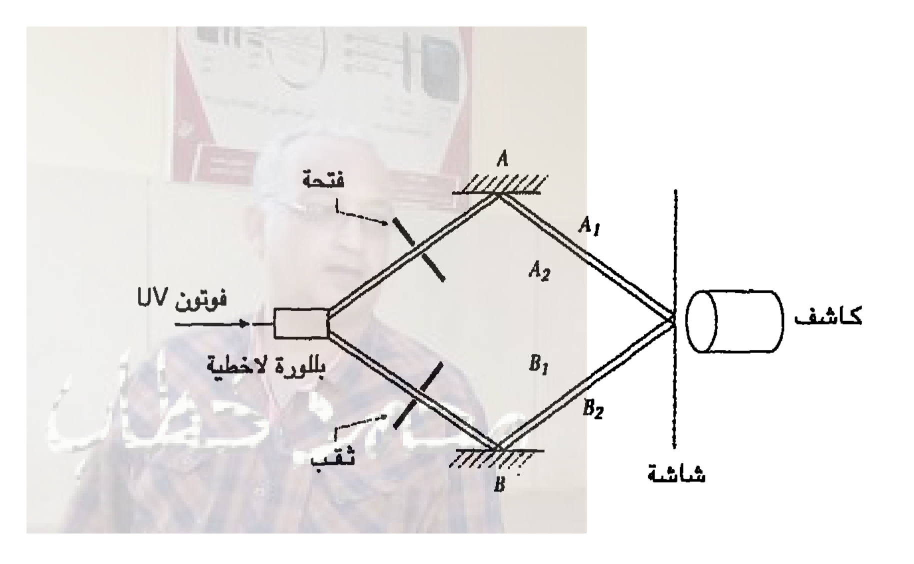


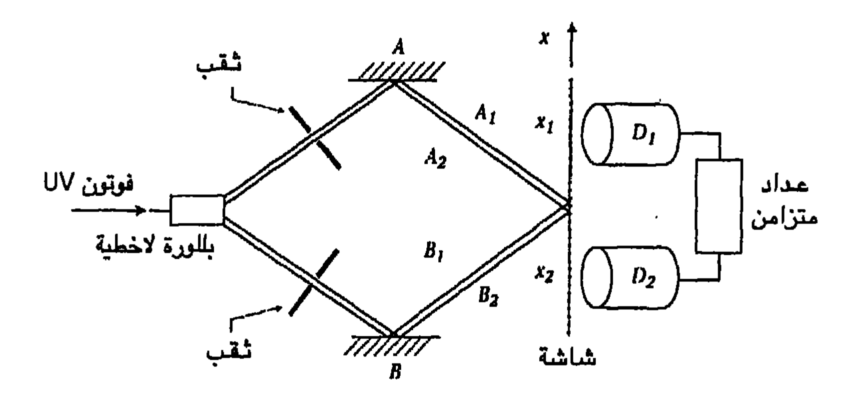
وكان أول عالم يستفيد من طريقة التحويل لأدنى لدراسة التعالق هو ليونارد مندل **Leonard Mandel** . وقد ولد مندل فى برلين عام ١٩٢٧، لكنه انتقل مع أسرته إلى إنجلترا وهو طفل صغير. وحاز شهادة الدكتوراه فى الفيزياء من جامعة لندن عام ١٩٥١، وأصبح محاضرا أساسيًا فى الفيزياء فى الإمبريال كولدج بجامعة لندن، حيث ظل يمارس التدريس حتى عام ١٩٦٤ . وفى تلك السنة، دُعِى ماندل للانضمام إلى كلية الفيزياء

بجامعة روشستر، فى نيويورك. وفى أمريكا أجرى ماندل أبحاثًا على الأشعة الكونية Cosmic rays ، التى تطلبت منه تسلق قمم الجبال الشاهقة ومعه أجهزة التجارب التى يمكنها كشف وقياس هذه الجسيمات عالية الطاقة وهى تنفذ من الغلاف الجوى للأرض. وعلى هذه الذرى العالية كانت توجد مثل هذه الجسيمات بوفرة بحيث يمكن قياسها على نحو أفضل مما على المستويات الأدنى. وبعد عدة سنوات من البحوث، غدا مندل مفتونا بعلوم الضوء إضافة إلى نظرية الكم، التى تتحكم فى سلوك الجسيمات التى كان يدرسها.

وفى أواخر سبعينيات القرن العشرين، باشر ليونارد مندل سلسلة من التجارب، بعضها مع جيف كمبل H. Jeff Kimble ، تشرح التأثيرات الكمية مع أشعة الليزر. وبعض هذا التجارب كانت تبحث الفوتونات المرتدة من ذرات الصوديوم المنفردة. وتناول عدد من هذه التجارب مبدأ التكاملية Complementarity : حيث بافتراض ازدواجية الموجة – الجسيم للضوء وفكرة الميكانيكا – الكمية فإنه يمكن البرهنة من خلال تجربة منفردة على مظهر واحد من مظهرى الضوء، وليس المظهرين. وأثبتت تجارب مندل بعض أهم الخواص الكمية البارزة للضوء. ففى بعض التجارب، أوضح مندل أنه إذا أتاح تصميم التجربة للتجريبى إمكانية القياس فقط، فإن ذلك يعد كافيًا لتغيير نتيجة التجربة من سلوك الشكل الموجى إلى الطبيعة الجسيمية.

وفى ثمانينيات القرن العشرين، بدأ ليونارد مندل وزملاؤه استخدام تقنية التحويل البارامترى لأدنى لتوليد فوتونات متعالقة. وإحدى هذه التجارب التى نشرت نتائجها عام ١٩٨٧ فى ورقة قدمها R.Ghosh ، ومندل فى مجلة Physical Review Letters (الجزء – ٥٩ ، ص . ص ١٩٠٣ – ١٩٠٥) توضح حقيقة مثيرة حول التعالق، والشكل التالى يوضح تصميم تجربة غوش ومندل.





وفى التجربة الواردة أعلاه: تم قذف بللورة لاخطية بشعاع ليزر، لتسفر عن إنتاج أزواج من الفوتونات المتعالقة. نظراً لأن الفوتون المار بالبللورة يمكنه إنتاج زوج من الفوتونات بأى طريقة من الطرق الكثيرة اللانهائية (لأن كل ما هو مطلوب لذلك أن يكون مجموع ترددات هذا النتاج مساويا لتردد الفوتون الأصلى)، بالتالي من الممكن وجود فوتونات تتعالق معاً على بعد معين من الشاشة.

وفى التجربة الموضحة فى الجزء العلوى من الشكل السابق، يتحرك كاشف دقيق، بمفرده على امتداد الشاشة. والمثير فى الأمر، اكتشاف جوش ومندل عدم وجود تداخل. وبالتالى فإن الفوتون الوحيد لا يمكن أن يسفر عن التداخل الذى من المتوقع حدوثه طبقًا لتجربة يانج المعروفة عن الشق المزدوج. وفى التجربة الثانية، الموضحة فى الجزء السفلى من الشكل السابق، تم استخدام كاشفين، عند نقطتين منفصلتين على الشاشة. ومرة أخرى، عندما يتحرك كل كاشف على حدة على امتداد الشاشة، لا يحدث أى تداخل، وحين علق جوش ومندل الكاشفين فى عداد متزامن: أى عداد لا يُسجل القراءة إلا إذا أضاء الكاشفان معا ثم قاما بتثبيت أحد الكاشفين وحركا الآخر على طول الشاشة – وجدا أن العداد المتزامن سجل حدوث تداخل واضح مماثلاً للتداخل الحادث من تجربة يانج ذات الشق المزدوج.

ويعزى السبب فى هذه النتيجة المفاجئة إلى أنه فى حين يتبين أن الفوتون المفرد فى نظرية الكم يمر فى المسارين ويمكنه التداخل مع نفسه ، كما اتضح من تجربة يانج، فإن الوضع يختلف فى حالة الفوتونات المتعالقة. إذ إن زوج الفوتونات المتعالق يؤلف كيانا واحداً حتى لو كانت تفصل بينهما مسافة. وما يحدث هنا أن كيان زوج الفوتونات المتعالق يمثل تراكبا لناتجَ حالتين، وبالتالى يكون هو الكيان الذى يتداخل مع نفسه: وهذا هو السبب فى حدوث التداخل عندما نعرف فقط بما يحدث فى اللحظة نفسها فى موضعين منفصلين على الشاشة – بمعنى، حين نتعقب الفوتونين المتداخلين بوصفهما كيانا واحدا – وفى هذا الإطار فقط سنرى القمم والقيعان المعتادة المعبرة عن شدة التداخل، بالنسبة لزوج من الفوتونات باعتبارهما عنصرا واحدا. وهنا، يتعين وجود جهتين للمراقبة تفصل بينهما مسافة، كل واحدة منهما تصاحب أحد الكاشفين، لمقارنة نتائجهما من أجل أن نرصد ما يحدث – إذ إن كل كاشف بمفرده يرصد فحسب وصولا عشوائيًا للفوتونات، ولا تتكون أشكال بمعدل قياس متوسط ثابت. وتبين هذه النتيجة فكرة مهمة عن التعالق: أنه من غير الصحيح التفكير فى الجسيمات المتعالقة ككيانات منفصلة. وفى بعض الأحيان، لا يكون للجسيمين المتعالقين الخواص نفسها وهما منفردان لكنهما يسلكان ككيان منفرد.

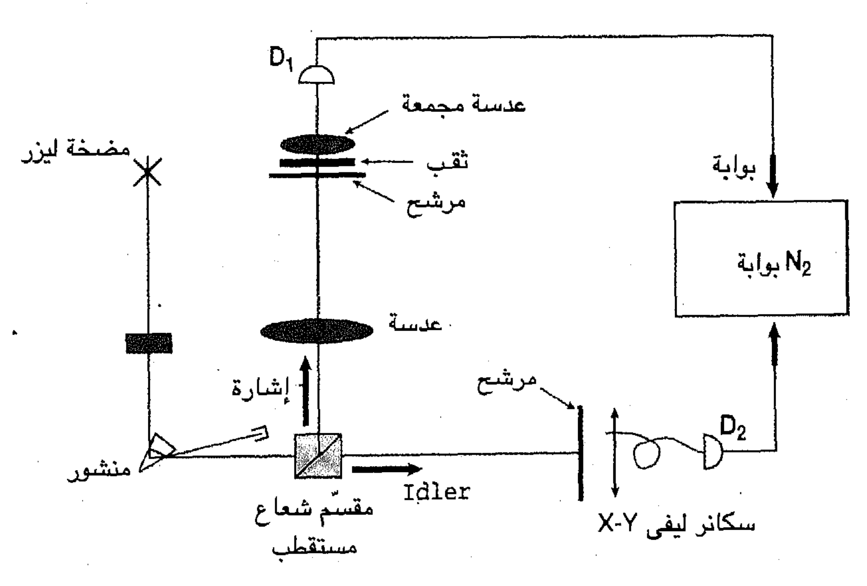
وظهرت تجربة من نوع آخر فى عام ١٩٨٩ عرضها جيمس فرانسون James Franson من جامعة جونز هوبكنز. فقد أشار إلى أن هدب التداخل لجسيمين يمكن أن تنشأ ونحن لا نعلم متى تم إنتاج الجسيمين. وقد أعد ريمون شياو Raymond Chiao من جامعة كاليفورنيا فى بيركلى وزملاؤه تجربة تعتمد على تصميم فرانسون، وكذلك مندل وزملائه. ويستخدم هذا النوع من تجهيزات التجارب مسارا قصيراً وآخر طويلا على كل ذراع من الذراعين، تفصل بينهما مرايا نصف مفضضة. ما هو المسار الذى اتخذه كل فوتون؟ إذ ينتج الفوتونان المتعالقان فى حالة التحويل لأدنى فى اللحظة نفسها، ويصلان معا. لكن نظراً لأننا لا نعلم متى تم إنتاجهما، فإننا نحصل على تراكب للمسار الطويل لكلا الفوتونين وكذلك للمسار القصير لكليهما. وينتج عن هذا تنظيم زمنى للشق المزدوج.

واستفاد فيزيائى آخر هو يانهوا شيه Yanhua shih من جامعة ميريلاند من تقنية SPDC فى تجربة موسّعَة لإنتاج فوتونات متعالقة، وقد بدأ منذ عام ١٩٨٣ سلسلة من التجارب تهدف إلى اختبار متباينة جون بل. وتميزت تجاربه بالدقة البالغة وأسفرت عن نتائج جاءت متفقة تماماً مع ميكانيكا الكم كما أضاف تعديلا لمتباينة بل. واستطاع شيه وزملاؤه إثبات انتهاك لمتباينة جون بل بلغ عدة مئات من الانحرافات المعيارية. وكانت هذه النتائج بالغة الأهمية من الناحية الإحصائية. وأجرى فريق شيه كذلك عدة تجارب باستخدام تجهيزات الخيار المتأخر، ومن خلالها، أيضاً، استطاعوا البرهنة على الاتفاق مع ميكانيكا الكم بدرجة عالية من الدقة.

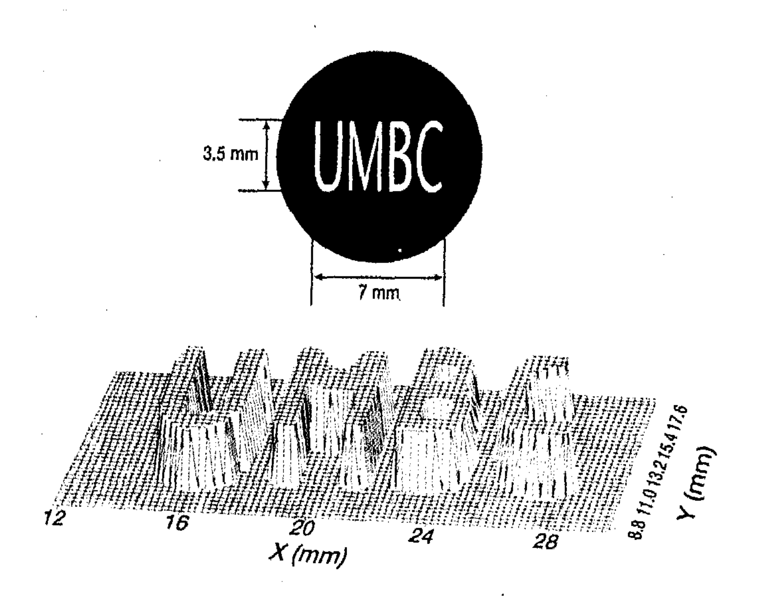
ثم درس شيه تأثيرات ظاهرة معقدة تسمى الماسح الكمى quantum eraser . فعندما نستطيع أن نحدد، باستخدام كاشف فى تجربة، أى المسارين اتخذه أحد الفوتونين، حينئذ لا يحدث التداخل. ولذلك عند تصميم تجربة لتحديد "أى مسار"، نتمكن من رصد طبيعة الضوء الجسيمية. وإذا كان تصميم التجربة لا يتيح للتجريبى القدرة على معرفة أى مسار من الاثنين اتخذه فوتون معين، نصبح فى إطار التصميم الكمى لـ "كلا المسارين". وفى هذه الحالة، نعتبر أن الفوتون وكأنه يتخذ المسارين كليهما فى اللحظة نفسها. وهنا، نلاحظ حدوث التداخل، وبالتالى تبين التجربة أن الضوء ذو طبيعة موجية. وبالوضع فى الاعتبار مبدأ بوهر للتكاملية، يغدو من غير الممكن فى التجربة ذاتها ملاحظة الطبيعة الموجية والجسيمية للضوء معا.

وقام شيه وزملاؤه بتصميم تجارب تتسم بالغرابة يمكنها "محو – مسح" المعلومات. والأكثر مدعاة للدهشة، أنهم استخدموا ماسح الخيار – المتأخر. وفى هذا السياق، نتج تعالق لزوج من الفوتونات وتم إدخاله فى نظام معقد من مقسِّمات "مجزئات" الأشعة (مرايا نصف مفضضة إما أن تعكس الفوتون أو تسمح له بالمرور باحتمال يساوى النصف). وبعد أن تم فعليا تسجيل فوتون واحد، بمعرفة موضعه على الشاشة، تم تشغيل مفتاح الجهاز عشوائيًا بحيث يتمكّن التجريبى فى بعض الأحيان من معرفة أى مسار تم اتخاذه، ولا يتمكن من ذلك فى أحيان أخرى. وبالتالى أمكن بعد اصطدام الفوتون الأول بالشاشة تحديد ما إذا كانت له طبيعة موجية أو جسيمية اعتمادا على معرفة فى أى جزء من الثانية تم تسجيل الفوتون الآخر عن طريق توأمه الذى مازال لم يكمل مساره.

إلا أن أكثر التجارب إثارة للاهتمام التى أجراها شيه وزملاؤه من وجهة نظر هذا الكتاب الذى بين يدينا، وكذلك عن طرق التطبيقات التكنولوجية، كانت تجربة "الصورة الشبحية" Ghost Image Experiment . فقد استخدمت هذه التجربة عنصرا واحد من كل زوج متعالق من الفوتونات ليجعل العنصر الآخر البعيد من الزوج نفسه يساعد فى خلق صورة "شبحية" فى الموضع البعيد(٣٠). والشكل التالى يوضح التجربة.

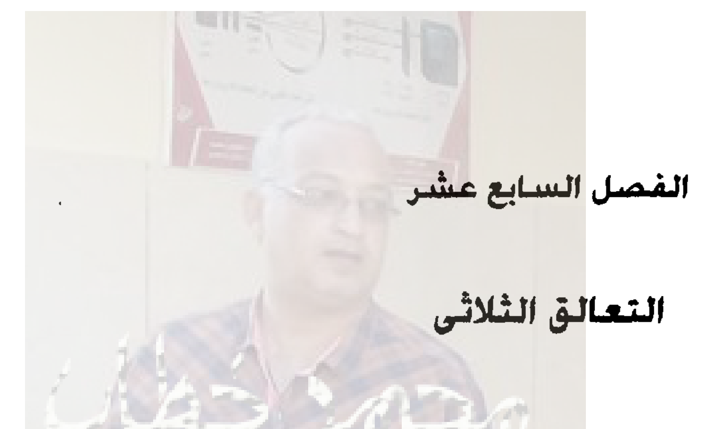


وكما نرى من الشكل، ثمة شعاع ليزر يقذف بللـورة لاخطية (بورات الباريوم)، مما يسفر عن إنتاج فوتونات متعالقة فى حالة التحويل اللحظى البارامترى لأدنى، التى تمر بعدها فى منشور، ثم إلى مقسِّم أشعة يقوم بتقسيمها حسب اتجاه استقطابها. وبالتالى يتجه فوتون من كل زوج متعالق إلى أعلى، من خلال عدسة، ويلتقى بمرشح به فتحة. وهذه الفتحة على شكل حروف UMBC (الحروف الأولى من جامعة ميريلاند بمقاطعة بالتيمور – وهى جامعة شبه University of Maryland Baltimore County)، ويتم منع مرور بعض الفوتونات، أما الفوتونات التى تمر من خلال فتحات الحروف فيتم تجميعها عن طريق عدسة ويتم الكشف عنها بالكاشف. ويتصل الكاشف الأول بعداد متزامن بالإضافة إلى الكاشف الثانى، الذى يجمع الفوتونات التوائم المارة من المرشح. وتمضى هذه التوائم مباشرة من خلال مقسِّم الأشعة. وتصطدم بمرشح وألياف فحص تُسجِّل مواضعها على الشاشة. وما يتم تسجيله فحسب هو تلك الفوتونات التى تتزامن مع التوائم التى تمر من خلال فتحات UMBC ، وهى تشكِّل الصورة الشبحية الخاصة بـ UMBC على الشاشة. والشكل التالى يوضح هذه الصورة الشبحية:



وهكذا، باستخدام الفوتونات المتعالقة، تم نقل الصورة UMBC إلى موضع يبعد عنها عن طريق توائم الفوتونات، التى مرت من خلال الحروف، بما يوفر تفسيراً حيا لجانب مثير من جوانب التعالق. وتنتقل الصورة لتصنع الشكل الشبحى باستخدام عنصرين: أولا: نحن لدينا الفوتونات التى وصلت إلى الشاشة ذات ألياف الفحص، دون أن يتم حساب كل الفوتونات التى تصل. ثانيًا: لدينا وسيلة اتصال دائمة بمن يلاحظ التوائم باستخدام عداد التزامن، وهى الفوتونات التى تعالقت مع الفوتونات الواصلة إلى الشاشة. ونحن لا نحصى من فوتونات الشاشة إلا التى تنتج "نقرة مزدوجة" مع توأمها الذى مر من فتحة الحروف. إن هذا الاتحاد لتعالق "أنبوبة كلاسيكية" للمعلومات هو الذى يتيح لنا إيجاد الصورة الشبحية.

أما المرحلة التالية في الحياة العلمية ليانهوا شيه فقد شدته لأهم المشروعات إثارة على الإطلاق: النقل الكمي عن بعد Quantum Teleportation ، وبعض الأفكار الأساسية حول النقل عن بُعْد لها توائم مماثلة فى أفكار تجربة الشبح. وعلى نحو خاص، يتطلب النقل الكمى عن بُعْد استخدام أنبوبتين فى اللحظة نفسها: "أنبوبة EPR" وهى تعنى أنبوبة من نوع تعالق "العمل - على - مسافة" (وهى فورية)؛ و"أنبوبة كلاسيكية" للمعلومات (تنحصر سرعتها فى إطار سرعة الضوء). وسوف نعود إلى موضوع النقل عن بعد فى موضع لاحق.



الفصل السابع عشر

التعالق الثلاثى

"قال أينشتين إذا كانت ميكانيكا الكم صحيحة فلابد أنه عالم مجنون، وكان أينشتين على صواب، فالعالم مجنون".

دانيال جرينبرجر

"ليس لعناصر أينشتين عن الواقع وجود، لا يمكن تقديم تفسير للرقص البديع بين ثلاثة جسيمات من خلال عالم حقيقى موضوعيا. فالجسيمات ببساطة لا تفعل ما تفعله بسبب ما هى عليه، إنما بسبب سحر الكوانتم".

مايكل هورن

"ميكانيكا الكم هى أشد اكتشافات الإنسان غرابة، لكنها أيضًا أكثرها جمالاً. وجمال الرياضيات التى تقف داعمة لنظرية الكم تعنى أننا اكتشفنا شيئًا بالغ الدلالة".

أنطون زايلنجر

حين تركنا مؤخراً مايك هورن كان يستمتع بثمار نجاح عمله مع أبنر شيمونى، وجون كلاوزر، وريتشارد هولت (CHSH) وبالتفسير الفعلى للتعالق من خلال تجربة تختبر متباينة جون بل، أسفرت عن نتائج تدعم ميكانيكا الكم، وأجراها كلاوزر وفريدمان. على أن نجاح (CHSH) والتفسيرات التجريبية المصاحبة لها لقيت اهتماما واسع النطاق فى الأدبيات الفيزيائية وبث الجديد فى العلم. ونُشرت مقالات تفسيرية فى عدة مجلات تتناول الاكتشافات الجديدة، وأجريت تجارب جديدة جددت الاهتمام حول أسس العالم العجيب للكوانتم.

وعقب ذلك مباشرة، اشترك كلاوزر، وشيمونى، وهورن، مع الرجل الذى استهل العملية جميعها: جون بل. وشرع الرجال الأربعة فى اتصالات مسهبة، ظهر بعضها فى أوراق بحثية، استهدفت الرد على التساؤلات ومناقشة الأفكار المطروحة من هنا وهناك. وأسفر هذا الاتصال المثمر عن نتيجة مؤداها أن فرضية جون بل تقوم على افتراضات أقل تقييداً، كما أنها تحسِّن فهمنا لظاهرة التعالق المذهلة.

وكان مايك هورن قد التحق عام ١٩٧٥ بمجموعة بحثية يرأسها كليف شل Cliff Shull من M.I.T ، قامت بإجراء تجارب على النيوترونات الناتجة فى المفاعل النووى فى M.I.T بكامبردج. وأمضى مايك عشر سنوات فى المفاعل، يجرى التجارب على تداخل جسيم وحيد مع النيوترونات. والتقى أيضًا مع اثنين من الفيزيائيين سيغيران مجرى حياته العلمية، والذى سيثمر عملهما المشترك معه عن قفزة عملاقة فى فهمنا للتعالق. وهذان العالمان هما دانيال جرينبرجر وأنطون زايلنجر. وسيكتب الثلاثة ورقة مبدعة تقول إنه يمكن حدوث التعالق بين ثلاثة جسيمات، وسوف يقضون السنوات فى دراسة خواص هذا التعالق الثلاثى. وبعد ذلك بعدة سنوات، حينما سألتهم عما إذا كانوا ثلاثتهم على نحو ما قد "تعالقوا" معًا، شأن ثلاثيات الجسيمات التى قاموا بدراستها. رد أنطون زايلنجر على الفور: "نعم، فى الواقع كنا قريبين جداً حتى إنه ما يكاد أحدنا يفتح فمه ليقول شيئًا ما، إلا ويكمل الاثنان الآخران العبارة التى على لسانه".. وثمة سبب وجيه وراء انتقال مايكل هورن من دراساته على تداخل اثنين من الفوتونات إلى أبحاثه على تداخل فوتون واحد. فبمجرد الانتهاء من عمل CHSH الذى ساعد فى تأسيس التعالق

بوصفه مبدأ أساسيًا فى أصول ميكانيكا الكم، قرر مايك دراسة قضايا أخرى خاصة بجذور هذه الأصول. كان يعرف جيداً تاريخ تطور أفكار نظرية الكم مع تطور أسس هذا الفرع من المعرفة. وكان يعلم أنه عندما أجرى يانج تجربته العجيبة باستخدام الضوء فى القرن الثامن عشر واكتشف نموذج التداخل الذى ما يزال محيراً لنا حتى يومنا هذا؛ كان الضوء (وغيره من الإشعاعات الكهرومغناطيسية) هو الـ "موجات" الميكروسكوبية الوحيدة المعروفة آنذاك. وبطبيعة الحال، حينئذ، وفى عام ١٩٠٥، طرح أينشتين فكرة الفوتون باعتباره حلا للتأثير الكهروضوئى، موضحاً أن الضوء ليس فحسب موجة لكنه تيار من الجسيمات أيضًا . كما كان مايك يعلم فى عام ١٩٢٤، أن دى برولى "خمن أن الجسيمات هى أيضًا موجات"، حسب فكرة مايك، إلا أنه "لم يستطع أى شخص فى ذلك الحين إجراء تجربة الشق المزدوج باستخدام الإلكترونات رغم التأكيد الصريح من أن الطبيعة الموجية التى اقترحها دى برولى سرعان ما ثبتت نتيجة انحراف الإلكترونات خلال البللورات". وبعد ربع قرن، وفى خمسينيات القرن العشرين، أجرى بالفعل الفيزيائى الألمانى مولنشتد **Moellenstedt** وزملاؤه هذه التجربة. وأوضحوا أن هذه الجسيمات، أى الإلكترونات، تبدى الطبيعة الموجية نفسها من خلال نموذج التداخل على حائل بمجرد نفاذها من جهاز يانج القديم ذى الشق المزدوج.

ومن ثم، وفى منتصف سبعينيات القرن العشرين، أجرى هيلموت روش **Helmut Rauch** فى فيينا، وأعقبه سام ويرنر **Sam Werner** فى ميسورى – كل منهما على نحو منفصل – تجربة شق مزدوج بشكل أساسى باستخدام النيوترونات. وهذه الأجسام الكمية ذات الكتل الكبيرة تبدى نماذج التداخل نفسها التى جعلناها ملازمة للموجات وهى تنفذ من جهاز تجربة الشق المزدوج. واستخدم الفريقان، فى فيينا وميسورى، كلاهما النيوترونات الحرارية: وهى نيوترونات تنتج عن تفاعلات تحدث داخل مفاعل نووى. وتسير هذه النيوترونات بسرعات بطيئة ("بطىء" مقارنة بسرعة الضوء) تبلغ نحو ألف متر فى الثانية، وتبعا لمعادلة دى برولى، تكون أطوال موجاتها المصاحبة عدة أنجسترومات. وهذه التجارب التى كانت تنطوى على تحديات هائلة غدت الآن ممكنة بفضل التكنولوجيا الجديدة لأشباه الموصلات، التى جعلتها بللورات السليكون النقية ميسورة إلى حد كبير.

وكان العلماء يستخدمون قطع سيليكون بحجم كف اليد لإنشاء مقاييس التداخل لمواجهة النيوترونات الحرارية القادمة من المفاعل النووى، ونظرا لتفاعل النيوترونات مع الشبكة البللورية، كان شعاع النيوترونات فى البداية ينقسم بالانحراف على أحد أوجه البللورة، ثم تستخدم الأوجه الأخرى لإعادته إلى وجهته وفى النهاية تتحد الأشعة لتنتج نموذج التداخل.

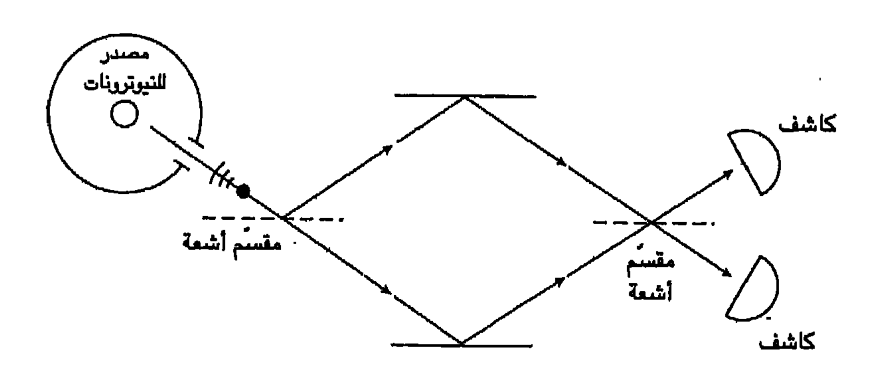
كان مايك شديد الاهتمام بهذه التجارب، التى كان قد تم إجراؤها فى التو. وكان يعلم أن كليف شل – أحد رواد بحوث النيوترون فى أربعينيات القرن العشرين، (وسينال جائزة نوبل عام ١٩٩٤) – لديه معمل فى مفاعل M.I.T . وأن عمله هناك يتمثل فى إجراء التجارب على النيوترونات الحرارية. كان مايك فى ذلك الحين يشغل منصبا فى تدريس الفيزياء فى كلية Stonehill ، ولم يكن يوجد مفاعل فى ستونهل كما لا يوجد بها فيزيائى معروف يشرف على توجيه الأبحاث الجديدة المثيرة. ولذلك، وفى أحد أيام عام ١٩٧٥، شق مايك طريقه إلى معمل كليف شل فى M.I.T ، وقدم نفسه. وذكر لشل عمله فى التعالق مع أبنر شيمونى وجون كلاوزر، واهتمامه بتجارب تداخل النيوترون. ثم سأل: "أيمكننى أن أؤدى دوراً؟".

وكان رد شل وهو يشير إلى أحد المكاتب فى جانب من المعمل: "خذ هذا المكتب هناك". ومن ذلك اليوم فصاعداً، طوال عشر سنوات، منذ عام ١٩٧٥ حتى ١٩٨٥، فى كل صيف، وكل أجازة لأعياد الميلاد، وكل أيام الثلاثاء (حيث لا يعمل بالتدريس)، كان مايك هورن يمضى أوقاته فى معمل شل بمفاعل M.I.T النووى يواصل العمل على حيود النيوترون. ووجد تجربتين فقط جذبتا اهتمامه بشكل خاص كانتا قد أجريتا بالفعل باستخدام النيوترونات فى فيينا وميسورى. وكانت مجموعة كليف شل قد أجرت تجارب أخرى كثيرة من هذا النوع فى M.I.T .

وتوضح التجربة – التى أجراها سام ويرنر ومعاونوه فى جامعة ميسورى عام ١٩٧٥ – أن تداخل النيوترون بتجربة الشق المزدوج يتأثر تأثراً مباشراً بالجاذبية – وهو الأمر الذى لم يكن معلوماً من قبل. إذ لم يتضح قط من قبل أى تأثير للجاذبية فى

التداخل فى ميكانيكا الكم. كانت تجربة ميسورى بارعة وفى الوقت نفسه تنطوى على بساطة المفهوم، وبالتالى تقدم تفسيراً لجوهر العديد من هذه التجارب الكمية.

كان قد تم ترتيب المسارين فى مقياس التداخل فى شكل ماسة Diamond ، وبمجرد دخول النيوترون إلى الماسة تنقسم موجته الكمية عند المدخل، ويتجه نصف الموجة يسارا، والنصف الآخر إلى اليمين. وفى الطرف الآخر للماسة، حيث يعود نصفا الموجة للاتحاد والاستثارة، كان يوجد إما قمة أو قاع حسب الشدة - كما يحدث تمامًا على الشاشة فى تجربة يانج الكلاسيكية، فيما عدا أن هذا يحدث هنا فى نقطة واحدة وليس فى نقاط متصلة على شاشة. وسجل العلماء أنهم وجدوا إما قمة أو قاعًا. وبعد ذلك، وبإدارة بللورة السيليكون، أداروا الماسة بمقدار ٩٠ درجة حتى تصبح رأسية وليست أفقية. ولاحظوا فى هذه الحالة تغيرا فى الشكل. وكان السبب فى هذا أن موجتى النيوترون تأثرتا بالجاذبية، إذ كانت إحداهما أعلى من الأخرى، ويسير النيوترون الأعلى بسرعة أقل. وأدى هذا إلى تغير فى طول موجة دى برولى على امتداد أحد المسارين مقارنة بالآخر، وبالتالى حدثت إزاحة لنموذج التداخل. والشكل التالى يوضح هذه التجربة.



ثمة تجربة أخرى أجراها هيلموت روش وزملاؤه فى فيينا عام ١٩٧٥، وكذلك مجموعة ميسورى فى تلك السنة، وهى تجربة $2\pi - 4\pi$ باستخدام النيوترونات. واكتشف فريق فيينا الذى يقوده روش باستخدام مقياس التداخل النيوترونى خاصية مبهرة للنيوترونات. فقد تم استخدام مجال مغناطيسى لتدوير النيوترون فى أحد مسارات مقياس التداخل بمقدار ٣٦٠ درجة (2π)، وفى حين أن الجسيمات التى يحدث لها حركة دورانية كاملة المسماة البوزونات Boson ، عندما تجرى لها دورة مماثلة، تعود إلى حالتها الأصلية (ذلك لإنها هكذا تدور دورة كاملة)، لكن الأمر نفسه لا يحدث للنيوترون بعد الدوران حول زاوية قيمتها ٣٦٠°، أى دورة كاملة، ويتضح أن النيوترونات حدث لها تغير جيبى (أى جيب الزاوية – المترجم) الذى يمكن ملاحظته من خلال ظاهرة التداخل. وعندما يؤدى المجال المغناطيسى لدوران النيوترونات مرة أخرى حول الدائرة (أى بمقدار 4π)، فإن النيوترونات تعود إلى حالتها الأصلية.

وفى بوسطن، تحدث أبنر شيمونى مع مايك هورن أثناء الفترة نفسها حول إجراء هذا النوع من التجارب باستخدام النيوترونات، بهدف البرهنة على ما هو معروف نظريًا بشأن خاصية ($2\pi - 4\pi$) ، النيوترونية دون أن يكونا على علم بأن روش وتلامذته فى فيينا قد أجروا بالفعل التجربة نفسها. وكتب مايك وأبنر ورقتهما وأرسلاها إلى مجلة للفيزياء، لكنهما سرعان ما اكتشفا أن مجموعة فيينا قد أجرت بالفعل الأمر نفسه وأنهما نفذا التجربة. وكان بين طلاب روش فى فيينا أنطون زايلنجر.

ولد أنطون زيلنجر فى مايو ١٩٤٥، فى ريد/إنكريس بالنمسا. وبين عامى ١٩٦٣، ١٩٧١ درس الفيزياء والرياضيات بجامعة فيينا وحصل على شهادة الدكتوراه فى الفيزياء من الجامعة عام ١٩٧١، وكان موضوعها عن "اللا استقطاب النيوترونى فى بللورات الديسبروزيوم(*) المفردة"، والتى كتبها تحت إشراف البروفيسور روش. وفى عام ١٩٧٩ أدى بحثه التأهيلى Habilitation(**)، حول النيوترون وفيزياء الجوامد

(*) الديسبروزيوم Dysprosium : عنصر فلزى نادر [المترجم] .

(**) البحث التأهيلى: بحث للتأهيل لمنصب المحاضر فى الجامعات الألمانية والنمساوية (المراجع) .

Solid State فى الجامعة الفنية Technical بفيينا. وبين عامى ١٩٧٢، ١٩٨١ عمل مساعدا جامعيا فى معهد البحوث الذرية بفيينا، ومرة أخرى كان يعمل مع روش.

توجد فى صقلية مدينة صغيرة رائعة تعود إلى القرون الوسطى تسمى Erice . وليس الفيزيائيون بغرباء عن الجمال والطبيعة لذلك وقعوا فى غرام هذه البلدة، المقفرة التى تلفها جبال جزيرة صقلية، ونظموا سلسلة من المؤتمرات السنوية بها، شدت إليها الفيزيائيين من كل أنحاء المعمورة. وفى عام ١٩٧٦، تم تخصيص المؤتمر المنعقد بها لأصول ميكانيكا الكم، بحيث يشمل دراسات عن متباينات جون بل والتعالق. وحينما تلقى روش إعلانا بالاجتماع سأل أنطون زايلنجر: "لماذا لا تذهب إلى الاجتماع؟ نحن لا نعرف الكثير عن أبحاث جون بل، لكن بمقدورنا أن نتعلم، وربما نتمكن ذات يوم من إجراء مثل هذه التجارب المثيرة، وكما سمعْت فسوف يشارك الباحثون المشتغلون فى التعالق، بمن فيهم مجموعة فيينا ... هيا اذهب وتعلّم قدر استطاعتك". كان أنطون سعيداً بموافقته، وحزم أمتعته للذهاب إلى صقلية.

وفى الوقت نفسه، فى بوسطن، كان أبنر، ومايك، وفرانك بيبكين من هارفارد يعدون حقائبهم أيضا، استعداداً للرحيل إلى صقلية، ومعهم مجموعة أوراق حول أبحاثهم فى التعالق ليعرضوها فى الاجتماع. وكانت ورقة مايك هورن المخصصة للاجتماع تتضمن عمله مع جون كلاوزر الذى دام عدة سنوات ، وكذلك استكمالا لفرضية جون بل التى تتعلق بالأوضاع الاحتمالية Probabilistic Settings . وفى صقلية، التقى فيزيائيو بوسطن مع أنطون زايلنجر للمرة الأولى. وقال مايك هورن: "اتفقنا معا مباشرة" وأضاف: "كان أنطون بالغ الاهتمام. وحاول أن يتعلم منى كل ما يستطيع عن فرضية جون بل، كان مفتونًا بالتعالق".

وبعد العودة إلى معمل كليف شل حيث المفاعل النووى فى M.I.T. ، وفى أحد الأيام توجه كليف إلى مايك متسائلاً: "هل تعرف شخصاً اسمه أنطون زايلنجر؟" وهو يشير إلى خطاب فى يده: "لقد كتب طلبا يبدى رغبته فى الحضور إلى هنا، وذكر اسمك فى خطابه". وأجاب مايك: "أوه، بالتأكيد. هذا شيء رائع!". وأضاف: "إنه فيزيائى مبهر.. شديد الاهتمام بأصول ميكانيكا الكم".

وانضم أنطون زايلنجر إلى فريق العمل فى .M.I.T فى العام الدراسى ١٩٧٨/٧٧ كزميل لما بعد الدكتوراه، مدعوما بمنحة فولبرايت للزمالة Fulbright ، وعلى مدى السنوات العشر التالية، وحينما أصبح بالفعل أستاذا فى فيينا، كان يأتى إلى كامبردج فى مهام محددة كثيرة، تدوم كل واحدة منها عدة شهور. وكان ينهمك فى العمل ليقوم بالنوع نفسه من أبحاث حيود النيوترونات التى كان يؤديها وهو طالب مع روش فى فيينا، وأمكن أن يشارك مايك هورن فى كتابة عدد كبير من أوراق البحث طوال سنوات، ومعهما كليف شل والطلاب العاملين معهم بالمعمل فى ذلك الحين، وكان الطلاب يتغيرون من سنة إلى أخرى. وظل يعمل على هذا المنوال حتى أحيل كليف شل إلى التقاعد عام ١٩٨٧ .

وأثناء تناول الساندوتشات، فى أوقات الراحة بالمعمل، ربما يجلس أنطون ومايك معا يناقشان تداخل جسيمين، وهو العمل القديم لمايك مع أبنر وجون وديك هولت. إلا أن عملهما الحالى كان يتضمن دراسات التداخل للنيترون المفرد. فقد باتت تجارب الجسيمين، وأفكار فرضية جون بل آنذاك مجرد هواية عاطفية، أحد الاهتمامات خارج عملهما اليومى. وفى استعادة مايك هورن لذكريات هذه الفترة يقول: "كنا نجلس هناك، لتناول غدائنا وكنت أزوده بالمعلومات عن فرضية جون بل والمتغيرات الخافية الموضعية، وكيف أنها لا تتفق مع ميكانيكا الكم"، ويضيف: "دائما ما كان يصغى بانتباه، راغبا فى سماع المزيد والمزيد".

ولد دانيال جرينبرجر فى the Bronx عام ١٩٣٣ . والتحق بالمدرسة الثانوية للعلوم فى برونكس وكان فى الصف نفسه مع ميريام ساراشيك Myriam Sarachik (الرئيس المنتخب للجمعية الفيزيائية الأمريكية، وهى الآن زميل لدانيال فى CCNY)(*)، والفيزيائيين الحاصلين على جائزة نوبل شيلدون (شيلى) وجلاشو Glashow وستيفن واينبرج Steven Weinberg . وعقب ذلك درس دانى (تصغير دانيال) الفيزياء فى .M.I.T وتخرج عام ١٩٥٤ . ثم ارتحل

(*) CCNY اختصار كلية المدينة فى نيويورك . (المراجع)

إلى جامعة إلينوى Illinois لإجراء بحوثه فى الدكتوراه فى مجال فيزياء الطاقة العالية مع فرانسيس لاو Francis Low . وبعد رحيل لاو ليتولى منصبا فى .M.I.T ، خلفه جرينبرجر، وكتب أطروحته فى M.I.T للحصول على الدكتوراه فى الفيزياء. وهناك درس الفيزياء الرياضية، بما فيها الطرق الجبرية باستخدام السيمتريات، التى أصبحت شائعة حاليًا فى الفيزياء النظرية الحديثة. وفى مطلع ستينيات القرن العشرين، انضم إلى جيفرى شيو Jeffrey Chew فى جامعة كاليفورنيا ببيركلى، ليعمل فى زمالة ما بعد الدكتوراه فى فيزياء الطاقة العالية. وتناهى إلى سمعه بعد ذلك أن سيتى كولدج City College فى نيويورك افتتحت مدرسة للخريجين وتتضمن مقررات فى الفيزياء، لذلك ذهب إلى هناك فى عام ١٩٦٣، وأصبح يعمل بتلك الكلية منذ ذلك الوقت وحتى الآن.

وظل دانى على الدوام مفتونًا بنظرية الكم. وفى دفاعه عنها يؤكد أن ميكانيكا الكم ليست مجرد نظرية تنضم إلى الفيزياء الكلاسيكية، عندما يزداد حجم الأجسام موضع الدراسة، بل إنها نظرية مستقلة تتمتع بثراء هائل لا يتبدى لنا مباشرةً. ويشبّه جرينبرجر نظرية الكم بجزر هاواى. وحسب مقاربتنا لهذه الجزر، فلا نرى منها سوى الجزء المرتفع عن سطح الماء: الجبال، والشواطئ. أما ما تحت السطح فثمة أجزاء هائلة خافية من هذه الجزر، تمتد إلى أعماق المحيط الباسيفيكى Pacific Ocean . وكمثال لتوضيح أن ميكانيا الكم ليست مجرد امتداد للفيزياء الكلاسيكية، بل إنها تملك هذا البعد الخفى، يطرح دانيال جرينبرجر فكرة دوران الأجسام الفيزيائية. ويذكّرنا بأن كمية الحركة الزّاوية وهى أحد عناصر الفيزياء الكلاسيكية لها ما يناظرها فى ميكانيكا الكم. لكن الحركة الدورانية Spin فلا توجد فقط إلا للأجسام الميكروسكوبية. وهى من مكونات عالم الكم وليس لها ما يناظرها فى الفيزياء الكلاسيكية.

وكان جرينبرجر مهتما بالتفاعل بين النظرية النسبية وميكانيكا الكم. وخصوصا، كان يريد اختبار مدى صحة مبدأ أينشتين المهم عن تساوى القصور الذاتى للكتل وخضوعها للجاذبية الأرضية على مستوى ميكانيكا الكم. ولكى يقوم بذلك، تأكد لديه أنه يحتاج إلى دراسة الأجسام الكمية التى تتأثر أيضا بالجاذبية الأرضية. وكان يعلم أن من هذه الأجسام النيوترون. ودائمًا ما يتطلع الفيزيائيون لمعرفة الصلة بين النظرية

النسبية العامة، وهى النظرية الحديثة للجاذبية الأرضية، وعالم الكوانتم. والنيوترونات من العناصر الكمية ذلك لأنها صغيرة الحجم، إلا أنها تتأثر أيضًا بالجاذبية الأرضية. لذلك، ربما يمكن التوصل للصلات بين هاتين النظريتين بدراسة النيوترونات.

وأجرى جرينبرجر اتصالا بالعلماء العاملين فى مفاعل أبحاث Brookhaven National (المعمل القومى فى بروكهافن) فى لونج أيلاند Long Island من أجل إجراء بحوث خاصة بالنيوترون، لكنهم أبلغوه بأنه لم يسبق لهم القيام بدراسات على التداخل باستخدام النيوترونات. ومع ذلك، اكتشف أن كليف شل فى .M.I.T سبق له إجراء مثل هذه البحوث، وفى عام ١٩٧٠ سافر دانى إلى كامبردج للقائه. وعقب ذلك بخمس سنوات طالع مقالا كتبه كل من كوليلا Colella ، وأوفر هاوزر Over Hauser ، وويرنر حول تأثير أهارونوف – بوهم، وأجرى اتصالا مع أوفر هاوزر وتبادل معه الرأى حول هذا التأثير. وأيقن دانى أن ثمة مظهرا يحتاج إلى كشف الغطاء عنه. وفيما بعد نشر ورقة حول هذا التأثير فى مجلة ريفيو أوف مودرن فيزيكس Review of Modern Physics . وفى عام ١٩٧٨، تم تنظيم مؤتمر لبحث هذه الموضوعات الفيزيائية بالمفاعل النووى الكبير فى جرينوبل Grenoble بفرنسا. ولم يستطع أوفر هاوزر – الذى تلقى دعوة لحضور المؤتمر – الذهاب إليه وطلب من جرينبرجر – إن كان لا يمانع، الذهاب بدلاً منه.

وفى جرينوبل، التقى دانى مع أنطون زايلنجر، الذى كان يعمل آنذاك بمفاعل جرينوبل بمعهد Laue - langevin ، باحثًا زائرًا لبعض الوقت. كما تقابل مع مايك هورن، وكان مثل دانى يحضر المؤتمر. ونظرًا لأن الثلاثة – جرينبرجر وهورن وزايلنجر – كانوا جميعا مهتمين بالموضوع نفسه، تأسست رابطة بينهم. ويتذكر جرينبرجر: "لقد غير هذا الاجتماع حياتى". ويضيف: "اتفقنا نحن الثلاثة حقيقة معا". ومن جرينوبل عاد أنطون إلى النمسا ليواصل بحوثه هناك، وعقب عودته إلى M.I.T ، غمرته السعادة حين وجد أن دانى جرينبرجر قد انضم أيضًا إلى فريق M.I.T ، فى زيارة قصيرة. إلا أن الزيارة سوف تتكرر مرات ومرات مجددا لسنوات عديدة. حتى إحالة كليف شل

للمعاش فى عام ١٩٨٧ – وهو ما أتاح للعلماء الثلاثة العمل معا عن قرب، وحتى بعد إقالة كليف، ومن خلال منحة N.S.F(*) لهم مع هيرب برنشتين Herb Bernstein من هامبشير كولدج أتيح لهم مواصلة بحوثهم.

استمر ذهاب أنطون إلى M.I.T ليمكث بها عدة شهور، وأحيانا سنوات فى كل مرة، بينما يأتى دانى فى زيارات خاطفة تستمر عدة أسابيع فى المرة الواحدة. وكان الاستثناء الوحيد بقاء دانى لفترة طويلة عام ١٩٨٠، حيث حصل على عطلات أيام السبت (السنة السبتية)(**). وسرعان ماأضحى العلماء الثلاثة مجموعة متآلفة متماسكة داخل جماعة العلماء الأكبر العاملة فى مفاعل M.I.T ، وكانوا ينفقون الساعات الطوال خارج المعمل يتحدثون عن التعالق، وهو الموضوع الذى شغل جانبا كبيراً من اهتمامهم. وفى داخل المعمل كانوا يعملون حصرياً على تداخل جسيم واحد (النيوترون)، وتركزت الكثير من مناقشاتهم خارج المعمل على التداخل الناجم عن جسيمين وكذلك عن فرضية جون بل الساحرة.

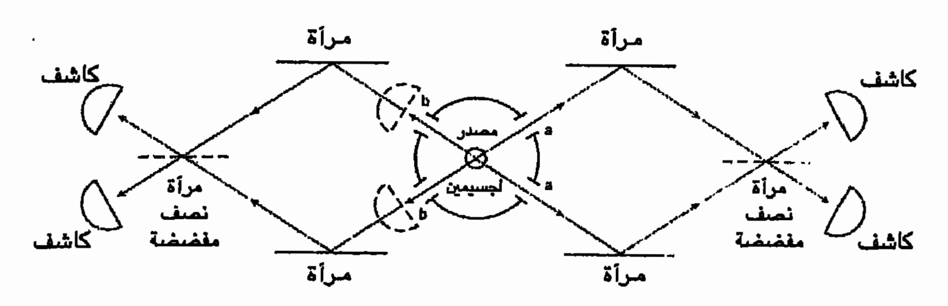
وكان التعالق كاملا بين الفيزيائيين الثلاثة. فقد لاحظ دانى ومايك فى اللحظة نفسها بعض الأمور الرياضية الغامضة فيما يتعلق بتأثير أهارونوف – بوهم الشهير الذى نشر فى خمسينيات القرن العشرين، وعلى نحو مستقل بحث كل منهما المسألة. وسجل دانى جرينبرجر نتائجه ونشرها فى إحدى المجلات. وكثيرا ما توصل أنطون ودانى إلى أفكار بينها روابط وثيقة حول الفيزياء، والأمر نفسه قد يحدث بين مايك وأنطون، اللذين استمرا لعشر سنوات يكتبان أوراقًا مشتركة حول أبحاثهما المتعلقة بتداخل جسيم واحد اعتماداً على عملهما فى معمل شل. وفى عام ١٩٨٠، أصدر مايك وأنطون ورقة مشتركة حول التعالق تقترح إجراء تجربة توضح أن الظاهرة تتحقق أيضًا بالنسبة لأوضاع جسيمين (إضافة إلى الحركة الدورانية أو الاستقطاب)، كما أنه يمكن تطبيق فرضية جون بل فى هذه الحالة.

(*) N.S.F : مؤسسة العلوم القومية (المراجع).

(**) عطلة السنة السبتية: إجازة تمنح لأستاذ الجامعة كل سابع سنة للراحة أو الرحلة أو البحث (المراجع).

وذات يوم من عـام ١٩٨٥، وصلت دعـوة إلى أنطون ومـايك عن مـؤتمر ينعـقـد فى فنلنده احـتـفـالا بالعـيـد الخـمـسين لصـدور ورقـة أينشـتين وبودولسكى وروسين (EPR) والثورة التى أحدثتها فى العلم. وقررا أن الذهاب إلى فنلنده ينطوى على فوائد عظيمة، إلا أنهما كانا بحاجة إلى ورقة حول تداخل جسيمين لعرضـها بالمؤتمر، فقد كان بحثهما عن الجسيم الواحد غير مناسب. وفى غضـون عدة أيام تمكنا من الحصول على تصميم لماسة مزدوجة لتجربة من نوع جديد لاختبار متباينة جون بل. وهكذا صار لديهما ورقة للمؤتمر. وتمثلت الفكرة فى إنتـاج فوتونات مـتعـالقـة يتلوها إجراء تجربة لتداخل هذه الفوتونات، باستخدام ماسة مزدوجة .

والشكل التالى يوضح هذا التصميم.



وفى تصـميم هذه التـجربة، ثمة مصدر من نوع خـاص يبث فى آن واحد زوجا من الجسيمات A ، B ، ينطلقان فى اتجاهين متضـادين. وبالتالى يمكن لهذا الزوج أن يمر إما من الفتحة a أو الفتحة b على الترتيب، أو من خلال الفتحتين aَ و bَ. وبفرض أن الجسيم B تم احتجازه عند أى من فتحتى الكاشفين b ، bَ . فإذا كان الجسيم B قد استقر عند b إذن يكون الجسيم A قد اتخذ الفتحة a . وبالطريقة نفسها، إذا استقر الجسيم B عند bَ ، إذن فإننا نعرف أن A قد أخذ الفتحة aَ . وبالتالى لكل ١٠٠ زوج ينتجه هذا المصدر فإن الكاشفين العلويين سيسجل كل واحد منهما ٥٠ جسيما من نوع "A" بمعنى، أنه لا يوجد تداخل لجسيم واحد هنا، ذلك لأنه بالتوصل إلى الجسيم B يمكن اكتشاف

المسار الذى اتخذه الجسيم A . وفى واقع الأمر، ليس من الضرورى إدخال أجهزة الكشف بالقرب من الفتحتين b ، bَ إذ تكفينا فحسب حقيقة أننا نستطيع تحديد الفتحة التى اتخذها الجسيم B لنلغى تداخل الجسيم الواحد بالنسبة للجسيم A .

ولنتخيل أننا ألغينا الكاشفين عند b ، bَ وأبقينا مراقبة الكاشفين "A" العلويين والكاشفين "B" السفليين مع انبعاث ١٠٠ زوج من الجسيمات من المصدر. وتتنبأ ميكانيكا الكم أن كل كاشف سيسجل ٥٠ جسيما، أى لن يكون ثمة تداخل لجسيم واحد لكل من A و B لأننا استطعنا تحديد المسار الذى اتخذه كل جسيم منهما باحتجاز الجسيم الآخر قريبا من المصدر. بيد أن ميكانيكا الكم تتنبأ بمعاملات ارتباط مذهلة بين عدادات القياس. وإذا استقر الجسيم B عند الكاشف الأيسر لأسفل، فإن A بالتأكيد يستقر بالكاشف الأيمن لأعلى؛ وإذا وجدنا B فى الكاشف الأيمن السفلى، لاستقر A فى الكاشف الأيسر لأعلى. إذ إن الكاشفين الأيسر السفلى والأيسر العلوى لا يعملان معا، وكذلك لا يعمل معا الكاشفان الأيمن السفلى والأيمن العلوى. ومع ذلك، إذا أزحنا أحد مقسِّمى الأشعة لمسافة مناسبة يمينًا أو يسارًا، تتغير معاملات الارتباط كليا. والآن فى حالة عمل الكاشفين فى الناحية اليسرى وفى الناحية اليمنى بترابط متزامن فإنه لا يعمل الكاشفان الموجودان على القطر نفسه. لكن لازال معدل العد لكل كاشف ثابتًا عند ٥٠، مستقلا عن مواضع جهازى تقسيم الأشعة. ويقول هذا السلوك فى ميكانيكا الكم إن كل زوج من الجسيمات ينبعث خلال الفتحتين a ، b وكذلك خلال الفتحتين aَ ، bَ ، وهذه الحالة الكمية الغامضة تعد مثالاً على تعالق جسيمين[٣١].

فى أحد الأيام، وقد جلس مايك هورن، ودانى جرينبرجر فى المطبخ بمنزل الأول، سأله دانى: "ما رأيك فيما سيحدث عند تعالق ثلاثة جسيمات؟" . كان السؤال، فى المقام الأول، ما هى تفاصيل معاملات ارتباط الجسيمات الثلاثة؟ وكان السؤال أيضًا: كيف يمكن لورقة EPR أن تتعامل مع ثلاث جسيمات متعالقة؟ ألا يمكن أن توجد أى مصاعب خاصة فى محاولة تقديم تقدير واقعى موضعى للتعالق. أو أيكون الخلاف بين ميكانيكا الكم وموضع أينشتين هو بصورة أساسية الخلاف نفسه كما فى زوج الجسيمات؟ بات دانى مقتنعا أن هذا كان اتجاها فى البحث جديرا باهتمامه خلال عطلته السبتية القادمة.

وبعد تفكير فى التجارب المحتملة، راح يستعيد في ذاكرته تجهيزات وو - شاكنوف في الانبعاث البوزيتروني، حيث كان يتسبب الجسيمان في إلغاء بعضهما البعض، وعادة ما كان ينبعث فوتونان عاليا الطاقة، لكن، وحسب قوانين الاحتمالات في ميكانيكا الكم، كانت تنبعث ثلاثة فوتونات غالبا بالكيفية نفسها أيضاً. وكان هذا تجهيزاً لتجربة يمكن الاحتفاظ به في الذهن خلال المشروع البحثي الجديد. وتفكّر مايك هورن في سؤال داني، ثم أجاب: "أعتقد أن ذلك سيكون موضوعا عظيما جديرا بالبحث". وعاد جرينبرجر إلى منزله، مشغول الفكر بالمسألة. وفي غضون الشهور القليلة التالية، كان يتصل بمايك قائلاً: "إنني أحصل على نتائج مهمة لتعالق ثلاثة جسيمات - عندي متباينات تروح وتجيء في كل مكان؛ في اعتقادي أن تعالق ثلاثة جسيمات قد يكون تحديا عظيما لورقة EPR أكثر من تعالق جسيمين". كان مايك مهتمًا. بيد أنه كان يعلم أن فرضية جون بل وأن التجارب أثبتت فعليا عدم صحة ورقة EPR ، وبالتالي ليست هناك حاجة ضاغطة إلى برهان آخر. إلا أن درجة اهتمامه بفيزياء تعالق الجسيمات الثلاثة كانت كافية لمناقشة الوضع مع داني وحثته على الاستمرار.

وفي عام ١٩٨٦، حين عاد أنطون إلى فيينا ليواصل العمل مع روش، كوفئ داني بمنحة زمالة فولبرايت، مما أتاح له السفر إلى أوروبا في عام إجازته Sabbatical Year وقرر أن ينتهز الفرصة لينضم إلى أنطون ويعمل معه في النمسا. وكانت قضية تعالق الجسيمات الثلاثة ما تزال تدور بشدة برأسه إبان سفره عبر الأطلنطي. وحين وصل إلى فيينا، كانت قد اختمرت لدى داني بالفعل الكثير من الأفكار الجيدة. كان يشعر أنه اقترب من وضع فرضية جون بل بدون متباينات. وفي فيينا، اقتسم أنطون وداني مكتبا واحداً، وكان داني يعرض دائمًا على أنطون تطورات نتائجه النظرية، وكان الاثنان يتناقشان فيها بالتفصيل. وفي نهاية الأمر، غدا في مواجهة داني جرينبرجر وضع ينطوي على معامل ارتباط كامل بين الجسيمات الثلاثة كافيا لاثبات فرضية جون بل. لم تعد ثمة حاجة إلى البحث عن معامل ارتباط جزئي بين الفوتونين، مثلما حدث تجريبيا على يد كلاوزر، وفريدمان، وأسبكت وآخرين. الآن أصبح هناك إثبات فعال على نحو باهر - وحتى أكثر بساطة من الناحية المفاهيمية لفرضية جون بل. وقال داني: "هيا بنا ننشره!"

وأضاف أنطون أنه أجرى مع مايك بعض العمل المشترك المتصل بالموضوع وينبغى تضمينه فى الورقة نفسها. وتباحث الاثنان مع مايك هورن فى بوسطن عبر الهاتف، وتقرر العمل فى ورقة حول الموضوع.

وفى عام ١٩٨٨، كان مايك يتصفح عددا من مجلة فيزيكال ريفيو ليترز فى معمل شل ولاحظ ورقة كتبها ليونارد ماندل. واحتوت الورقة على تصميم لتجربة مماثلة تقريبا للتصميم الذى سبق واقترحه هو وأنطون فى عرضهما بمؤتمر فنلنده. وتمثل الفرق الوحيد أنه فى تصميم تجربة تداخل جسيمين لماندل كانت هناك ماسة مطوية بدلاً من الماسة المستقيمة كما فى الشكل المقترح من هورن – زايلنجر. غير أن ماندل – الذى لم يكن قد شاهد محاضر جلسات مؤتمر فنلنده – قد أجرى أيضاً التجربة فعليا، واستخدم طريقة التحويل لأدنى لإنتاج فوتونات متعالقة. وهكذا، لم تكن تجربة تداخل جسيمين مجرد تجربة فكرية، بل أصبحت حقيقة واقعة. أكثر من هذا، غدا فى الإمكان الآن إجراء تجارب جون بل مع تعالق شعاع وبدون حركة دورانية أو استقطاب.

ونظراً لأن أنطون ومايك قد اقتصرا على تقديم افتراضهما عن تداخل جسمين، وعن تجارب جون بل بدون استقطاب فى المؤتمرات، ونظراً لأن فهمهما لأسس التعالق بالنسبة إلى التداخل كان مختلفًا وأكثر بساطة من ماندل، لذلك قررا تقديم نتائجهما إلى الفيزيكال ريفيو ليترز لنشرها، وانضم إليهما أبنر فى كتابة الورقة. ولأن الورقة كانت على نحو أساسى تعليقًا على تجربة ماندل التى تعد اختراقًا، فإن المجلة انتدبت ماندل بنفسه ليفصل فى الأمر. وأعقب ذلك فترة طويلة من النشاط والتعاون تواصل فيها بحث تداخل الجسيمين باستخدام التحويل لأدنى على يد فريق بوسطن، وماندل فى روشستر، وشيه فى ميريلاند، وآخرين.

وما أن قرروا فى عام ١٩٨٦ العمل معاً فى مقال حول تعالق الجسيمات الثلاثة، ترك أنطون، ومايك ودانى مشروع الكتابة معلقا إلى حد ما وواصلوا عملهم المعتاد. وغادر دانى جرينبرجر فيينا وراح يطوف بأوروبا. وفى النهاية انتهت إجازته السبتية التى امتدت عاماً كاملاً، وعاد إلى نيويورك وإلى عمله الروتينى فى التدريس. وعلى مدى

عامين لم يطرأ أى جديد بالنسبة إلى نتائج الحديثة المبهرة حول تداخل الجسيمات الثلاثة.
وبعد ذلك، وفى عام ١٩٨٨، نال دانى منحة زمالة ألكسندر فون همبولدت Alexander Von Humboldt لإجراء بحث فى جارشنج Garching بألمانيا فى معهد ماكس بلانك، ليقضى هناك ثمانية أشهر كباحث زائر. وأثناء وجوده هناك اتصل هاتفيًا بأنطون فى فيينا قائلاً: "الآن لدى وقت للكتابة"، وأضاف:"لقد انتهيت من كتابة ٧٠ صفحة. وإنْ كنت لم أكد أبدأ بعد". إلا أن الكتابة التقليدية للورقة لم يحدث بها تقدم. فقد قام دانى بجولة فى أوروبا، يجرى أحاديث حول عمله مع أنطون ومايك يتعلق بخواص الجسيمات الثلاثة المتعالقة ومدى الصلة بينها وبين فرضية جون بل وورقة EPR . ومع نهاية صيف ١٩٨٨، ذهب دانى جرينبرجر إلى مؤتمر Erice بصقلية لذلك العام. وتحدث حول تعالق الجسيمات الثلاثة، وكان من بين المستمعين دافيد ميرمين David Mermin من كورنل – وهو فيزيائى متخصص فى الكوانتم. ووفقا لما ذكر دانى أنه أحس بأن الورقة لم تجذب فى الواقع اهتمام ميرمين.

لكن حين عاد دانى إلى نيويورك، بدأ يتلقى أوراقًا من مجموعات عديدة للفيزيائيين يستخدمون فيها عمله الأصلى مع مايك وأنطون كمرجع. وكان من بين مجموعات الفيزيائيين هذه واحدة يرأسها مايكل ردهيد Michael Redhead من جامعة كامبردج. وزعمت مجموعة ردهيد أنها أجرت تحسينات على عمل جرينبرجر – هورن – زايلنجر حول تداخل الجسيمات الثلاثة، الذى سبق وقدمه دانى فى مؤتمر Erice وفى أماكن أخرى بأوروبا. واتصل دانى تليفونيًا بأنطون ومايك وقال: "لابد أن نفعل شيئًا فى الحال، الناس حاليًا يستخدمون عملنا كمرجع دون أن يتم نشره حتى الآن".

وفى عام ١٩٨٨، تقدم دانى بورقة، نشرت فى مؤتمر للفيزياء عقد بجامعة جورج ماسون. وفى الوقت نفسه تلقى دافيد ميرمين ورقة ردهيد، التى استخدمت عمل جرينبرجر، وهورن، وزايلنجر مرجعا لها. وفى عموده تحت عنوان "إطار مرجعى Reference Frame" فى مجلة Physics Today ، كتب ميرمين مقالاً عنوانه: أين الخطأ فى عناصر الواقع هذه". وكانت مجلة فيزيكس توداى هى المجلة الإخبارية التى تصدرها الجمعية الأمريكية للفيزياء، وبالتالى حققت الورقة انتشارا واسعا، وأضحى المجتمع الفيزيائى على علم كامل

بالنتائج الجديدة، وراح يستخدمها مرجعيا على النحو "تعالق GHZ"(*) - رغم أن الورقة المشتركة لكل من جرينبرجر، وهورن، وزايلنجر لم تكن قد نشرت بعد. (فى كثير من العلوم، فإن الورقة المدرجة ضمن وقائع جلسات أى مؤتمر لا تعتبر بنفس مستوى ورقة منشورة فى مجلة مرجعية). وفى الواقع، فإن اثنين من مؤلفى الورقة لم يكونا على علم بأن ورقة تحمل اسميهما تم تقديمها فى مؤتمر، ونشرت ضمن وقائع جلساته. فقد نسى دانى أن يخبرهما بهذه الواقعة.

وذات يوم قال أبنر لمايك: "ما هو الشىء الذى برهنت عليه أنت ودانى وأنطون؟"، فرد مايك متسائلاً: "ما هو هذا الشىء؟"، فأعطاه أبنر ورقة دافيد ميرمين. وكان ميرمين فى ورقته يشرح أن ميكانيكا الكم تتعارض مع المتغيرات الخافية، وبالتحديد فى حالة الجسيمات الثلاثة المتعالقة، وقد نسب بوضوح هذا البرهان الذى قدمه إلى جرينبرجر، وهورن، وزايلنجر. وقبل أن يعرف السبب، تلقى مايك مراسلات من المجتمع الفيزيائى تهنئه على نجاح ورقة GHZ . وفى ٢٥ نوفمبر ١٩٩٠، بعث جون كلاوزر ببطاقة إلى مايك هورن من بيركلى يقول فيها:

"عزيزى مايك:

أيها الثعلب العجوز، ابعث لى بنسخة من GHZ . يبدو أن ميرمين يعتقد أنها مادة فائقة السخونة".

ووصلت بعض التهانى من أناس على قمة المهنة، بمن فيهم حاصلون على جائزة نوبل. وسرعان ما أدرك الفيزيائيون الثلاثة أنه من المناسب نشر بحثهم فى مجلة مناسبة. ولذلك، وجهوا دعوة إلى أبنر شيمونى للانضمام إليهم، نظراً لأنه كان يؤدى عمل جون بل منذ البداية. وفى عام ١٩٩٠، صدرت الورقة "فرضية جون بل بدون متباينات" تأليف جرينبرجر، هورن، شيمونى، وزايلنجر، فى المجلة الأمريكية للفيزياء American Journal of Physics على الرغم من فكرة تعالق الجسيمات الثلاثة وتعديلات فرضية جون بل تواصل تسميتها GHZ[٣٢].

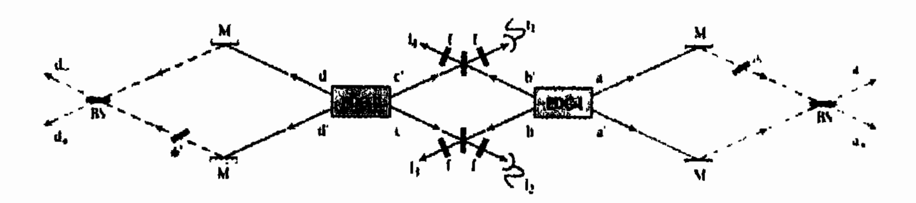
(*) وهى الحروف الأولى من أسماء جرينبرجر، وهورن، وزايلنجر . (المراجع)

ويمكن لنسق الجسيمات الثلاثة فى عرض فرضية GHZ إما أن يكون تعديلا لتجربة حركة دورانية أو استقطاب، أو يمكن أن يكون تعديلاً لتعالق شعاع. ويوضح الشكل ص٢٤٤ من النص E تعديل الاستقطاب فى نسق التجربة.

ومن أكثر الأمور غرابة حول تعالق الجسيمات الثلاثة، والسبب الرئيسى للاهتمام الذى لقيه طرح GHZ ، أنه يمكن استخدامه فى إثبات فرضية جون بل بدون المعالجات المرهقة للمتباينات.

ومازال السؤال مطروحا: كيف يمكن إجراء تعالق لثلاثة فوتونات فى المعمل؟ فهذا أمر لا يمكن تحقيقه إلا من خلال خاصية كميّة محيّرة حقًا، كما تم توضيحه من خلال ما طرحه زايلنجر وشركاؤه العاملون معه عام ١٩٩٧ . وثمة توضيح فى الشكل التالى.

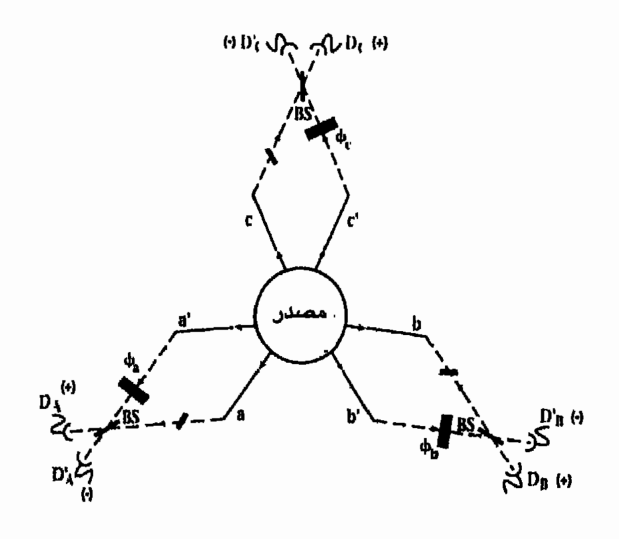
لنفرض وجود زوجين من الفوتونات المتعالقة ضمن تجهيزات تجريبية معينة تجعل عنصرا من أحد الزوجين يتعذر تمييزه عن عنصر آخر من الزوج الثانى، وتم احتجاز فوتون واحد من الفوتونين اللذين لم يتم تمييزهما، تغدو الفوتونات الثلاثة المتبقية متعالقة. وما لا يمكن تصديقه هنا أن الفوتونات أصبحت متعالقة لأن مراقبا خارجيا لا يستطيع أن يحدد الزوج الذى أنتج الفوتون المحتجز. ثم، إذا نحينا جانبا الفوتون المحتجز، لتعالقت الفوتونات الثلاثة المتبقية. وقد استطاع زايلنجر ومعانوه إنتاج هذا النسق فعليا عام ١٩٩٩ .



وثمة كتابات تتناول برهان GHZ لفرضية جون بل باستخدام الفوتونات الثلاثة المتعالقة، إذ يعرضها كل من دافيد ميرمين، ومجموعة GHZ أنفسهم، وكذلك في كتاب صدر مؤخراً لدانيال ستير Daniel Styer وفيها معالجات بأشكال مناسبة ككتاب مدرسي.

ويسهل التوصل إلى هذه المعالجات لسببين مشتركين: الأول: أن التنبؤات الكمية لا تعتمد على الاشتقاقات بل يتم ببساطة تقديم وصف لها، لذلك فإنها تعفى القارئ من معرفة المشتقات الرياضية. والثانى: لا يتم وصف كل التبنؤات الكمية، بل لا يحدث ذلك إلا للتنبؤات التى تحتاج إلى معالجة. والتعديل التالى أجراه مايك هورن، واستخدمه فى مايو ٢٠٠١ فى محاضرته البحثية المميزة التى قدمها فى كلية ستونهيل كولدج ولطلابها. وهذا التعديل يستعير الكثير من المعالجات المبكرة، مع التبسيط الإضافى الذى يستخدم تعديل GHZ لتعالق الشعاع، وبالتالى يتجنب الحركة الدورانية أو الاستقطاب. وتم اقتباس هذه المعالجة من محاضرة مايك بموافقة كريمة من مؤلفها وبمساعدته.

يوضح الشكل التالى تجهيزات تجربة GHZ للشعاع المتعالق، وهى بوضوح تعميم مباشر لقياس تداخل جسيمين ليصبح ثلاثة جسيمات. توضع مرآة نصف مفضفضة عند كل موضع من المواضع الثلاثة لتتخذ أحد وضعين، إما الوضع الأيسر (L) ، أو الوضع الأيمن (R) . وتتغير نتائج التجربة تبعا لهذه الأوضاع.



ويوضح الشكل نسقا يوجد به مصدر من نوع خاص جداً فى المركز يبث ثلاثة جسيمات متعالقة فى آن واحد ونظراً لأن هذه الجسيمات (أو الفوتونات) هى أجسام كمية، كما أنها متعالقة، فإن كل "ثلاثى جسيمى" يمر من الفتحات a ، b ، c ، معا وكذلك خلال الفتحات a َ، b َ، c َ، ولأنها تمر عن طريق تصميم الماسة الثلاثية، فإن كل جسيم يصطدم بمقسِّم أشعة (مرآة نصف مفضضة)، يمكن أن تتخذ الوضع L أو الوضع R .

وتتنبأ ميكانيكا الكم بأنه لكل جسيم تحدث النتائج أما +١ أما –١ (التى تناظر الحركة الدورانية "لأعلى" أو "لأسفل" للجسيم، أو اتجاه الاستقطاب الرأسى أو الأفقى للفوتون) للترددات المتساوية: وتكون فى نصف الزمن +١ ، وفى نصف الزمن –١، بصرف النظر عن مواقع مقسمات الشعاع. وإذا نظرنا إلى أزواج الفوتونات، فمازلنا لا نرى أى شكل مثير للانتباه: فكل أزواج النتائج (+١ ، +١) ، (–١ ، –١) ، (+١ ، –١) ، (–١ ، +١) سوف تحدث مع التردد المتساوى (١/٤الزمن لكل منها) لكلا الجسيمين A ، B (وبالطريقة نفسها للأزواج الأخرى B و C و A و C)، بصرف النظر عن مواقع مقسمات الشعاع. ومع ذلك تتنبأ ميكانيكا الكم أن أى ملاحظ سيرى رقصا سحرياً فعليا إذا تعين عليه أن ينظر لما يحدث للجسيمات الثلاثة جميعها. وعلى سبيل المثال، تتنبأ ميكانيكا الكم أنه إذا كان مقسّما الشعاع للجسيمين B و C كلاهما فى الوضع L ، كما استقر هذان الجسيمان، مثلا، على كواشف النتيجة –١، وإذا كان مقسم الشعاع A فى الوضع R ، إذن لاستقر بالتأكيد الجسيم A على الكاشف +١ . وهذا تنبؤ ملحوظ بدرجة قوية، كما توجد تنبؤات متقنة مماثلة للتوليفات الأخرى للأوضاع. ويعرض الجدول التالى ملخصاً لهذه العمليات ولتنبؤات ميكانيكا الكم.

	أوضاع مقسات الشعاع			تنبؤات ميكانيكا الكم
	A	B	C	
١	R	L	L	يستقر صفر أو ٢ جسيم فى الوضع –١
٢	L	R	L	يستقر صفر أو ٢ جسيم فى الوضع –١
٣	L	L	R	يستقر صفر أو ٢ جسيم فى الوضع –١
٤	R	R	R	يستقر ١ أو ٣ جسيم فى الوضع –١

ثمة عمليات توليف أخرى مثل LLL لا نحتاج إليها فى هذا العرض.

والتنبؤات المذكورة على يسار الجدول لعمليات التوحيد فى يمين الجدول حصل عليها كل من جرينبرجر وشيمونى وزايلنجر باستخدام رياضيات ميكانيكا الكم. وبطبيعة الحال، فقد بدأوا بحالة التعالق الفعلية للجسيمات الثلاثة. وفكرة التعالق هى عملية تراكب الحالات، كما نعرف، وبالنسبة لثلاثة جسيمات يمر كل منها خلال فتحتين، نحصل على حالة تراكب يمكن كتابتها (على نحو ما بالصيغة المبسطة) على الصورة:

$$(a'b'c' + abc)$$

وهذه المعادلة هى الصيغة الرياضية لتعالق الجسيمات الثلاثة، وفيها العلامة "+" تحتجز الاثنين – والخاصية المذكورة سابقًا.

ومن هذه المعادلة، التى تصف عملية تراكب الحالات – بمعنى، تقدم وصفا رياضيًا يطابق تمامًا ما هو المقصود بتعالق ثلاثة جسيمات، ضمن إطار الترتيب الخاص لهذه التجربة التى تحتوى على ست فتحات. استنبط الفيزيائيون الرياضيات واشتقوا التنبؤات المدونة فى الجدول السابق. ويمكن الحصول على التفصيلات الفعلية من ملحق الورقة "فرضية جون بل بدون متباينات" التى كتبها كل من جرينبرجر، وهورن، وشيمونى، وزايلنجر، فى العدد ٥٨ بتاريخ ١٢ ديسمبر ١٩٩٠ من المجلة الأمريكية للفيزياء، American Journal of Physics . وينبغى ملاحظة أنه حتى فى ورقتهم العلمية، فإن المؤلفين قد أحالوا الاشتقاق الجبرى – للتنبؤات الميكانيكية الكمية والتى تعتمد على معادلة الحالة – إلى ملحق، وكان ملحقًا مطولًا إلى حد بالغ، وهو عنصر أساسى فى ميكانيكا الكم. ويمكن للقارئ المهتم (المتمكن من الرياضيات) أن يتابع هذه التفاصيل فى الملحق. والأمر المهم الذى يتعين على القارئ فهمه هو أن التنبؤات المدونة بالجدول أعلاه تتفق على نحو تام مع ما تقول لنا ميكانيكا الكم إنه سيحدث فى كل حالة. ولا يوجد المزيد فى هذه التنبؤات أكثر من تطبيق قواعد ميكانيكا الكم على نسق معين وعلى حالة التعالق للجسيمات الثلاثة. ولذلك سنأخذ هذه التنبؤات باعتبارها نتائج صحيحة ومباشرة لتعالق ثلاثة جسيمات.

وإذا عدنا إلى جدولنا عن التنبؤات الميكانيكية الكمية لحالة تعالق الجسيمات الثلاثة، نجد أنه: بفرض معرفة أوضاع مقسم الشعاع، وبفرض معرفة النتائج المعينة للجسيم B والجسيم C ، فإن ما يحدث للجسيم A قابل للتنبؤ على نحو موثوق. وعلى سبيل المثال، نفرض أن مقسمى الشعاع للجسيمين B و C كلاهما فى الوضع L ، وأن الجسيم B يستقر فى الكاشف -١، وكذلك C فى -١ . إذن إذا كان مقسم شعاع الجسيم A فى الوضع R ، فإن الجسيم A سيذهب بالتأكيد إلى الكاشف +١ . وثمة معاملات ارتباط تامة مماثلة - كما يلاحظ من الجدول السابق - لخيارات أخرى لأوضاع مقسم الشعاع والنتائج الأخرى فى موقعين. وباختصار، بفرض معرفة أوضاع مقسم الشعاع والنتائج المعينة للجسيمين B و C ، فإن نتيجة الجسيم A قابلة للتنبؤ على نحو مؤكد.

نصل الآن إلى الجزء المهم فى بحث GHZ ولنفهم ما هى حقيقته، ولماذا تقدم ورقة GHZ هذا الشرح الفعال وتطرح إضافة لفرضية جون بل، علينا أن نرجع إلى ما قاله أينشتين وزميلاه قبل ٥٥ عاما مضت، فى ورقة EPR عام ١٩٣٥ .

لاحظ أينشتين وشريكاه فى البحث معاملات الارتباط اللافتة للنظر بكل معنى الكلمة الخاصة بتعالق جسيمين على المستوى النظرى. وأوضحوا أن معاملات الارتباط هذه تتسم بالتعقيد، إلا إذا كانت تكشف ببساطة عن وجود مسبق لخواص حقيقية موضوعيا للأجسام المتعالقة. وأكد أينشتين وزميلاه التزامهم بوجود واقع موضوعى Objective Reality على النحو التالى (فى ورقة EPR لعام ١٩٣٥) :

"إذا استطعنا فى حالة عدم وجود أى وسيلة تسبب اضطرابا للنظام، أن نتنبأ بدقة بمقدار كمية فيزيائية إذن لابد من وجود عنصر لواقع فيزيائى يتطابق مع هذه الكمية الفيزيائية".

والآن، فإن استقرار الجسيم A فى كاشفه +١ هو "عنصر من الواقع" حسب التعريف السابق لأينشتين، لأننا نستطيع أن نتنبأ بأن ذلك سيحدث بدقة، وبوضوح لم نتسبب فى اضطراب الجسيم A من خلال اختيارنا لأوضاع جهاز تقسيم الشعاع عند

الموضعين B و C . كما أن النتيجة عند A تعتمد فى أغلبها على موضع الجهاز المقسم الشعاع عند الوضع A ، وليس عند B أو C . والآن، نظراً لأن استقرار الجسيم A فى الكاشف +١ هو "عنصر من الواقع"، ولنطلق على هذا العنصر من الواقع A(R) . إذن A (R) هو عنصر من الواقع عند الموضع A . وهو يدل على النتيجة عند A عندما يتجه مقسم الشعاع – الذى يتحكم فى الجسيم A – إلى اليمين (R) . ومن أجل التوصل إلى النتيجة المعينة من استقرار الجسيم A على مقسم الشعاع +١، نقول إن عنصر الواقع هو +١ ونكتبه على الصورة: A (R) = +١ . وبالمثل بالنسبة للمواضع والتوليفات الأخرى، نحصل، بحسب أينشتين، على ستة عناصر للواقع: A (R) ، B (R) ، C (R) ، A (L) ، B (L) ، C (L) . وكل عنصر منها يأخذ القيمة إما +١ ، أو –١ .

ونصل الآن إلى فرضية GHZ : نفرض أن عناصر الواقع لأينشتين لها وجود وبإمكانها شرح تنبؤات ميكانيكا الكم الأخرى المثيرة للحيرة المعطاة فى الجدول السابق (والتى تم – فى الوقت الحاضر – البرهنة على صحتها تجريبيا بتجربة فعلية لتعالق ثلاثة جسيمات أجراها زايلنجر عام ١٩٩٩). فإن الاتفاق مع التنبؤات الكمية ١ ، ٢ ، ٣ ، ٤ فى الجدول السابق يفرض القيود التالية على عناصر الواقع:

١) $C (L) B (L) A (R) = +1$

٢) $C (L) B (R) A (L) = +1$

٣) $C (L) B (L) A (L) = +1$

٤) $C (R) B (R) A (R) = +1$

والصياغات السابقة صحيحة للأسباب التالية: فى الحالة (١): تكون الأوضاع فى الحالة RLL ، وطبقا لميكانيكا الكم، كما هو مدون فى الجدول السابق: "إما صفر أو ٢ جسيم تذهب إلى –١" وبالتالى يكون إما صفر أو ٢ من عناصر الواقع A(R) ، B (L) ، C (L) هى التى تساوى –١ . وإذا أجرينا عملية ضرب للعناصر الثلاثة كلها أى ١ × ١ × ١ = ١ (فى حالة ذهابهم إلى –١) أو ١ × (–١) × (–١) = ١ (فى حالة ذهاب جسيمين إلى –١)

بصرف النظر عن الترتيب. وبالمثل فى الحالتين (٢) و (٣) يكون حاصل ضرب عناصر الواقع يساوى ١، إما لأن كل واحد من العناصر الثلاثة = ١ (فالعنصر صفر يذهب إلى -١)، أو لأن اثنين منها تساوى -١ (فى حالة ذهاب جسيمين إلى -١)، ويكون الثالث +١ .

وفى الحالة (٤) فإن تنبؤ ميكانيكا الكم هو إما جسيم واحد يذهب إلى -١ أو ٣ جسيمات تذهب إلى -١, إذن فإن النتائج الممكنة لعناصر الواقع الثلاثة A(R) ، B (R) ، C (R) هى :

-١ مضروبة فى +١ مرتين، أو ثلاثة مضروبة فى -١ معا. وفى الحالتين يكون الناتج عدد فردى من - s1 وبالتالى تكون الإجابة -١ .

ونصل الآن إلى الخدعة الكبرى: نضرب المعادلات الثلاثة أعلاه معا: بضرب الأطراف اليمنى نحصل على C(R) C(L) C(L) B(L) B(R) B(L) A(L) A(L) A(R) = C(R) B(R) A(R).

والسبب فى صحة هذه النتيجة أن كل حد تم استبعاده من الطرف الأيسر للمعادلة يظهر مرتين فى الطرف الأيمن للمعادلة. وكل حد من الحدود A(L) ، B (L) ، C(L) قيمته إما +١ أو -١، وإذا ظهر هذا الحد مرتين فى المعادلة، فإن حاصل ضرب الحد فى نفسه يساوى +١ بالتأكيد (لأن +١ × +١ = + ١؛ -١ × -١ = + ١).

والآن، نضرب حدود الأطراف اليسرى فى المعادلات (١)، (٢)، (٣) نحصل على +١ × +١ × +١ =+١ ، وبالتالى نحصل على C (R) B (R) A (R) = +1 .

غير أن تنبؤات ميكانيكا الكم للمعادلة (٤)، تقول : C(R) B(R) A(R) = -1 .

إذن ثمة تناقض. وعلى ذلك فإن "عناصر الواقع" والموضع لأينشتين لا يمكن أن يكون هناك احتمال لوجودها إذا كانت ميكانيكا الكم صحيحة. كما أن المتغيرات الخافية يستحيل وجودها فى إطار ميكانيكا الكم. كذلك فإن الجسيمات المتعالقة لا تسلك الطريقة التى تسلكها لأنها "سابقة البرمجة" بأى شكل كان: فمثل هذا النوع من البرمجة محال وجوده إذا كانت الجسيمات تسلك طبقًا لقواعد نظرية الكم. وتوضح

الفرضية أن أى فئة تعليمات قد تكون لدى الجسيمات لابد أن تكون متعارضة من داخلها internally inconsistent ، وبالتالى فهى مستحيلة. وسوف يمكن الحصول على الجسيمات التى تستجيب فى اللحظة نفسها أيا كانت المسافة التى تفصل بينها من أجل أن تقدم لنا النتائج التى تحددها نظرية الكم. هذا هو سحر التعالق.

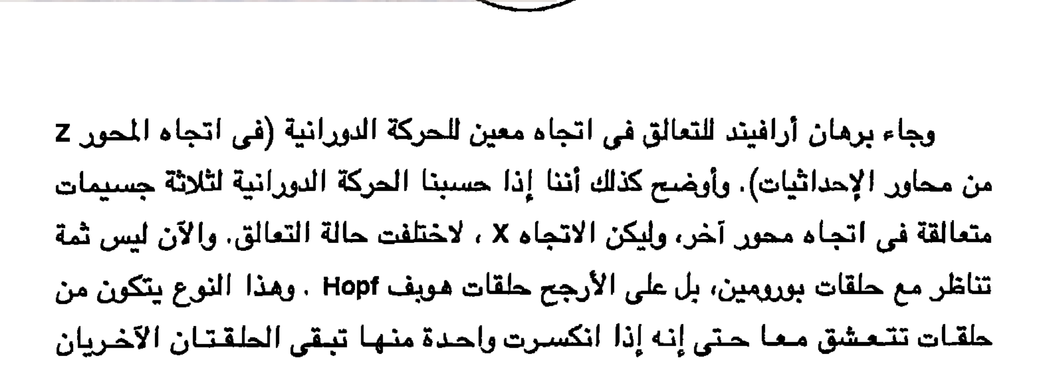
أكثر من هذا، أوضحت التجارب الفعلية أن نظرية الكم صحيحة، وبالتالى تكون فرضية أينشتين عن واقعية الموضع غير صحيحة. وتبرهن فرضية GHZ على هذا التناقض بأسلوب أكثر مباشرة بكثير، وأسهل فى الفهم، لا يعتمد على الإحصاء مقارنة بفرضية جون بل الأصلية.

ويتذكر مايك هورن قائلاً: "فى عملنا كله، لم يكن هناك أى نوع من التنافس، كان بالفعل عملا رائعا" وهو يصف لى عمله مع زملائه فى التوصل إلى تصميم GHZ وكذلك اكتشاف حالة التعالق ثلاثى الجسيمات لـ GHZ . وأضاف "كنا محظوظين بالعمل فى مجال لا يمارسه إلا عدد ضئيل جدا من الناس، ولذلك كان كل فرد يلقى ترحيبا من الآخرين الذين كانت تثيرهم المسائل نفسها الخاصة بأصول ميكانيكا الكم".

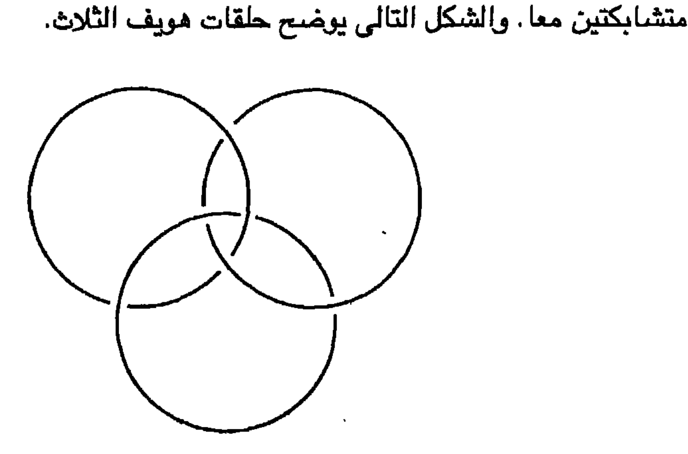
على أن هؤلاء العلماء، بعملهم معا فى تجانس، أنتجوا واحدا من أهم الإسهامات فى الفيزياء الحديثة. ولعل عملهم يمتد ويتسع فى السنوات القادمة، ولعله يفيد فى وضع بذور تكنولوجيات جديدة كان لا يمكن تصورها إلا من خلال مؤلفى الخيال العلمى قبل سنوات قليلة.

بيد أن حلقات بورومين Borromean حازت اسمها من أسرة بورميو Borromeo التى ينتمى أفرادها إلى عائلة من النبلاء الإيطاليين. وتمتلك هذه العائلة مجموعة جزر بورومين الجميلة فى بحيرة ماجيورى Maggiore شمالى إيطاليا. ويتكون شعار النبالة للأسرة من ثلاث حلقات مضفورة بطريقة مثيرة للاهتمام؛ فإذا انكسرت واحدة منها، فلن تبقى الاثنتان الأخريان متصلتين. ولعل هذه الحلقات تمثّل الفكرة: "باتحادنا نصمد وبانقسامنا نسقط" [أو كما يقال فى العربية الاتحاد قوة والتفرق ضعف - المترجم]. وقد درس الفيزيائى أرافيند P.K.Aravind التعالق واكتشف صلات بين التعالق الذى نصت عليه ميكانيكا الكم وأنواع متباينة من العقد الطوبولوجية. وبشكل خاص، طرح

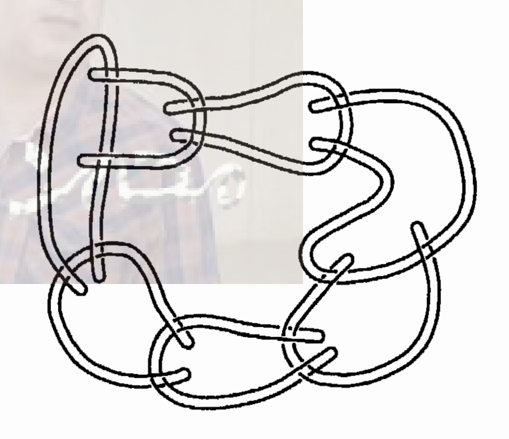
أرافند للنقاش فكرة التناظر واحد إلى واحد بين حالة تعالق GHZ للجسيمات الثلاثة وحلقات بوروميين. والشكل التالى يوضح حلقات بوروميين[٣٣].



وجاء برهان أرافيند للتعالق فى اتجاه معين للحركة الدورانية (فى اتجاه المحور Z من محاور الإحداثيات). وأوضح كذلك أننا إذا حسبنا الحركة الدورانية لثلاثة جسيمات متعالقة فى اتجاه محور آخر، وليكن الاتجاه X ، لاختلفت حالة التعالق. والآن ليس ثمة تناظر مع حلقات بوروميين، بل على الأرجح حلقات هويف Hopf . وهذا النوع يتكون من حلقات تتعشق معا حتى إنه إذا انكسرت واحدة منها تبقى الحلقتان الآخريان متشابكتين معا. والشكل التالى يوضح حلقات هويف الثلاث.



كما شرح أرافيند أنه يمكن حدوث حالة تعالق لعدد n من الجسيمات عند النظر إليها باعتبارها تعميما لحلقات بوروميين الثلاثة. ويوضح الشكل التالى التوصل إلى ارتباط لعدد من الجسيمات يماثل سلسلة متصلة تشبه الحلقات التالية:



ولا يزال دانى جرينبرجر يتبادل قضاء بعض الوقت من حين إلى آخر بين زيارة مايك هورن فى بوسطن وأنطون زايلنجر فى فيينا، وهكذا يبقى التعالق حيا بين هؤلاء الأصدقاء الثلاثة المتميزين. وفى النمسا، يمضى وقته مع مجموعة بحث أنطون بجامعة فيينا – وهى مجموعة مهمة تجرى أعمالاً رائدة تغطى نطاقا واسعا من السلوك الكمى والتعالق، بما فيها النقل عن بعد. وشهد دانى مؤخرا حفلاً أعدته مجموعة البحث. وهناك التقى بابنة شرودنجر وكان معها حفيد شرودنجر – من أم أخرى. وهذا الشاب – وهو عضو بالمجموعة البحثية – لم يكتشف أن جده كان فيزيائيًا عظيما إلا بعد أن أصبح بالغا وأضحى هو نفسه فيزيائيًا متخصصا فى الكوانتم.


محمد خطاب

الفصل الثامن عشر

تجربة الكيلو مترات العشرة

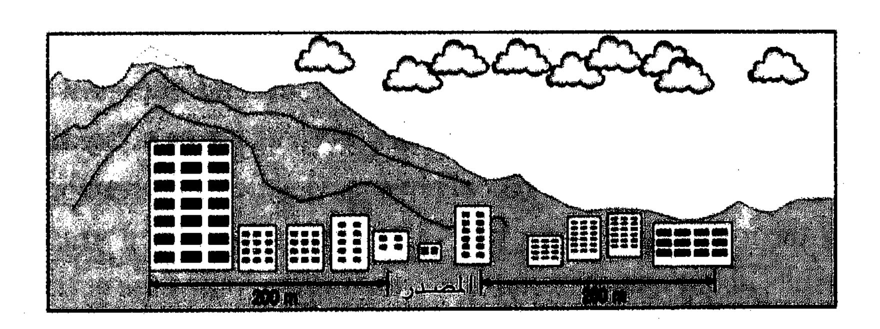
"بفرض وجود جسيمين منفصلين، وكل منهما معلوم تماماً، ودخلا فى وضع بحيث يؤثر كل منهما فى الآخر، ثم انفصلا مرة أخرى، لذلك يحدث لهما على نحو منتظم ما أسميه تعالق معرفتنا بالجسيمين".

إيروين شرودنجر

سطّر الفصل التالى عن تاريخ ظاهرة التعالق الغامضة نيكولاس جيسين من جامعة جنيف. وقد ولد جيسين فى جنيف عام ١٩٥٢ ودرس الفيزياء النظرية فى جامعتها. ونال شهادة الدكتوراه فى هذا المجال. ودائمًا كان مهتماً بالغموض الذى ينطوى عليه التعالق. وفى سبعينيات القرن العشرين، التقى مع جون بل فى CERN ، وافتتن بالرجل بشدة، وفي وقت لاحق وصفه بأنه رجل حاد الذهن ومثير للإعجاب. وسرعان ما تعرف جيسين على عمل جون بل باعتباره من الإنجازات المبدعة في الفيزياء النظرية. وكتب جيسين عدداً من الأوراق النظرية حول فرضية جون بل، مبرهنا لنتائج مهمة خاصة بالحالات الكمية. وبعدها أمضى بعض الوقت فى جامعة روشستر، وهناك التقى مع بعض رواد بحوث الضوء: ليونارد ماندل الذى رفعه عمله إلى مستوى الأسطورة فى هذا المجال، وكذلك إميل وولف Emil wolf .

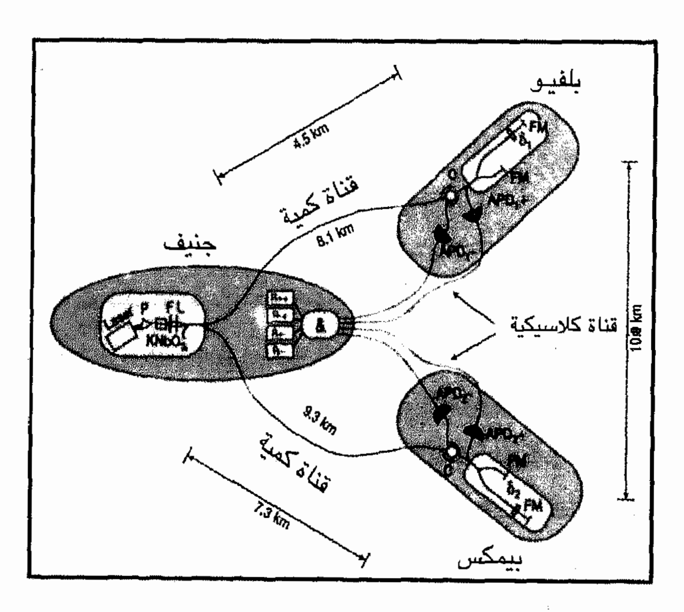
وبعد ذلك عاد نيكولاس إلى جنيف واشتغل بالصناعة طيلة أربع سنوات. وكانت هذه نقلة في عمله حالفها التوفيق فقد أتاحت له دمج شغفه بميكانيكا الكم مع الممارسة العملية فى الألياف البصرية. وكانت الصلة التى ابتدعها بين تكنولوجيا الألياف البصرية ونظرية الكم، قد أثبتت أنها حاسمة للعمل الجديد حول التعالق. وأقام صلات على نفس القدر مع شركات الهواتف. وبمجرد عودته إلى جامعة جنيف، بدأ فى تصميم تجارب لاختبار متباينة جون بل.

وفى غضون تلك الفترة، فى تسعينيات القرن العشرين، قام كل من كلاوزر وفرايدمان وآخرين بإثبات أول انتهاك تجريبى لمتباينة جون بل، أما الآن أسبكت فقد مضى فى العمل لمدى أبعد من أى شخص، ببرهنته على أن أى إشارة تنطلق من نقطة معينة من أجهزة التجربة إلى نقطة أخرى فإنه يتعين عليها أن تسير بسرعة أكبر من سرعة الضوء، وبالتالى أثبت أن إشارة من هذا النوع لا يمكن استقبالها. وقد أجريت تجربة أسبكت داخل فضاء المعمل. وعقب تجارب أسبكت، استطاع أنطون زايلنجر ومعاونوه العمل على مدى أكبر تم خلاله اختبار التعالق إلى مئات الأمتار، عبر عدد من المبانى المحيطة بمعملهم فى النمسا. والشكل التالى يوضح ذلك.



بيد أن جيسين أراد أن يخطو لمدى أبعد. فى البداية صمم تجربة سارت فيها الفوتونات المتعالقة لمسافة ٣٥ مترًا، داخل معمله.

وأتاحت له علاقاته بشركات الهاتف الاستفادة من دعمهم السخى لإجراء تجربة طموحة. وتعين لمدى التجربة ألا يكون مسبوقًا: إذ لم تكن تجربة جيسين على الفوتون فى الهواء بل داخل كابل (حزمة) من الأليـاف الضوئية. كما امتد الكابل من موضع إلى آخر حتى بلغ ١٠,٩ كيلو متر (سبعة أميال) فى خط مستقيم. وبحساب المسافة الفعلية التى قطعها، بالوضع فى الاعتبار كل الانحناءات والثنيات فى الكابل، بلغت المسافة الكلية ١٦ كيلو مترًا (عشرة أميال). وأقبل جيسين على التجربة بعقل مفتوح. فإما أن يحصل على نتيجة مبهرة: تؤكد نظرية الكم أو نتيجة تدعم أينشتين وزميليه. وجاءت النتيجة تؤكد غلبة التعالق؛ "أعمال الأشباح البعيدة" التى كان يمقتها أينشتين كثيرا. ومرة أخرى تم استخدام متباينة جون بل لتوفر دعما قويًا فى اتجاه اللاموضع. وبالأخذ فى الاعتبار تجهيزات التجربة، فإن انبعاث إشارة من أحد طرفى الكابل إلى الطرف الآخر منبئًا أحد الفوتونين بالوضع الذى وجده الفوتون الآخر – يكون على هذه الإشارة أن تنطلق بسرعة تعادل مائة مليون ضعف سرعة الضوء. والشكل التالى يوضح مخطط التجربة.

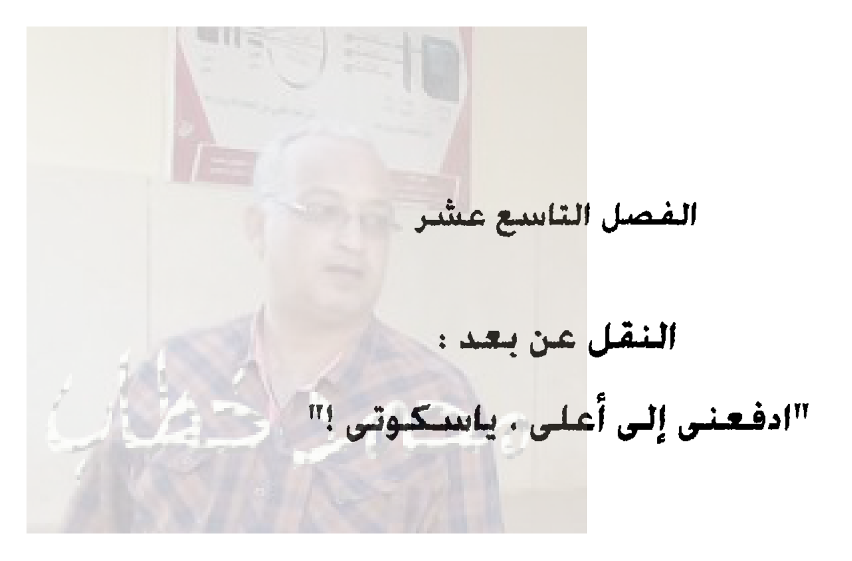


ومثل بعض الفيزيائيين الآخرين، يعتقد جيسين أنه فى حين لا يتيح لنا التعالق بث رسائل مقروءة بسرعة أكبر من سرعة الضوء، فإن هذه الظاهرة لا تزال تنتهك روح النسبية الخاصة. لذلك كان يريد اختبار ظاهرة التعالق خلال إطار نسبى. وفى إحدى تجاربه استخدم سطحا ماصًا للضوء داكن اللون، ووضعه عند طرفى الليفة الضوئية، لإضعاف شدة الدالة الموجية. وكان طرفا الليفة الضوئية – التى كان من المقرر أن يظهر عندهما الفوتونات المتعالقة – قد أزيح أحدهما عن الآخر لعدة كيلومترات، وتحرك السطحان الماصان بسرعة هائلة لأقصى حد. وعن طريق معالجة شروط هذه التجربة، أمكن دراسة ظاهرة التعالق باستخدام إطارات مرجعية نسبية مختلفة. وهكذا أمكن معالجة الزمن نفسه ليتطابق مع النظرية الخاصة للنسبية: إذ أمكن قياس كل فوتون عند وصوله إلى نقطة النهاية فى أزمنة مختلفة. فى أول التجربة، كان أحد فردى زوج الفوتونات هو الأسبق فى الوصول إلى هدفه، وفى التجربة الثانية وصل توأمه قبله. وهذه التجربة المعقدة باستخدام إطارات مرجعية متحركة أسفرت عن تأكيد قوى لتعالق اللاموضع وعن صحة تنبؤات ميكانيكا الكم.

وفى تسعينيات القرن العشرين، تم إعلان الخبر المدوى بخصوص تكنولوجيا الكوانتم وكان عن الكريبتوجرافيا Cryptography . وقد تقدم بفكرة استخدام التعالق فى كريبتوجرافيا الكوانتم آرثر إيكرت Arthur Ekert من جامعة أوكسفورد عام ١٩٩١ . وهذا التعبير ينطوى على خطأ إلى حد ما حيث أن الكريبتوجرافيا هى فن كتابة الرسائل باستخدام الشفرة. ومع ذلك عادة ما تعنى كريبتوجرافيا الكوانتم الأساليب المستخدمة لتجنب واكتشاف أجهزة التنصت. ويلعب التعالق دورا مهمًا فى هذه التكنولوجيا الجديدة. وأعرب شركاء جيسين فى شركات الهواتف السويسرية عن اهتمامهم البالغ بهذا النوع من البحوث؛ نظرًا لأنه قد يفتح الباب أمام تطوير شبكات اتصال آمنة. وقام جيسين بإجراء البحوث على كريبتوجرافيا الكوانتم، وفى إحدى تجاربه الحديثة أمكن بث رسائل آمنة لمسافة ٢٥ كيلو مترًا (١٦ ميلا) تحت مياه بحيرة جنيف. ويعرب جيسين عن حماسه لإنجازاته العظيمة فى الكريبتوجرافيا، سواء ما يُستخدم فيها

التعالق أو أى وسائل أخرى، ويرى أنه مجال خصب وبالإمكان استخدام الكريبتوجرافيا الكمية على نطاق تجارى لمسافات مماثلة لما حققتها تجاربه. وقد أمضى جيسين بعض الوقت فى لوس آلاموس Los Alamos ، حيث يوجد فريق من العلماء الأمريكيين أنجزوا تقدما فى مجال الحساب الكمى، وهو تكنولوجيا جديدة مطروحة – وفى حالة نجاحها – سوف تستخدم فيها الكينونات المتعالقة.


محمد خطاب



الفصل التاسع عشر

النقل عن بعد :

"ادفعنى إلى أعلى ، ياسكوتى !"

"إن التعالق، بالإضافة إلى تراكب الحالات، لهو من أغرب ما جاءت بها ميكانيكا الكم".

وليم فيليبس

ظل النقل الكمى عن بعد حتى فترة قريبة مجرد تجربة فكرية، فكرة لم يحدث على الإطلاق تجربتها بنجاح فى دنيا الواقع. لكن فى عام ١٩٩٧، حالف النجاح فريقين من العلماء فى تحقيق حلم نقل الحالة الكمية لجسيم مفرد عن بعد.

والجدير بالذكر أن النقل الكمى عن بعد هو وسيلة لنقل حالة جسيم واحد إلى جسيم ثان، قد تكون بينهما مسافة، تنقل بفاعلية الجسيم الأول إلى موضع آخر. ومن حيث المبدأ، هذه هى الفكرة نفسها – فى هذه النقطة الموجودة فقط فى إطار روايات الخيال العلمى – التى أمكن من خلالها نقل الكابتن كيرك Kirk عائدا إلى سفينة الفضاء أنتربرايز Enterprise عن طريق سكوتى Scotty ، وهو على متن سفينة الفضاء.

على أن النقل عن بعد هو أكثر التطبيقات غرابة التى يمكن أن نتخيلها لظاهرة التعالق. وحديثًا، قام فريقان دوليان – أحدهما ترأسه أنطون زايلنجر فى فيينا، والآخر برئاسة فرنسيسكو دى مارتين فى روما – باستعارة فكرة النقل عن بعد من

دنيا الخيال إلى عالم الواقع. وقد اتبعوا اقتراحًا طرحه عام ١٩٩٣ تشارلز بينيت فى مقال نشره بمجلة عن الفيزياء. وقد أوضح بينيت Bennett بأن ثمة إمكانية فيزيائية لنقل حالة كمية لجسيم عن بعد.

وكان السبب فى بدء تفكير الفيزيائيين فى النقل عن بعد أنه فى ثمانينيات القرن العشرين أوضح كل من وليم ووترز Wootters وزيوريك W.Zurek أن أى جسيم كمى لا يمكن "استنساخه" أبدًا. وتقول فرضية عدم الاستنساخ التى وضعها ووترز وزيوريك أنه إذا كان لدينا جسيم، فلا يمكن نسخ حالته على جسيم آخر، فى حين يبقى الجسيم الأصلى على حالته. وبناء عليه، يستحيل خلق نوع من آلية نسخ تأخذ جسيما وتطبع معلوماته على جسيم آخر، مع الحفاظ على الجسيم الأصلى دون أى مساس. وبالتالى، فإن الوسيلة الوحيدة التى يمكن للفيزيائى أن يتبعها ليطبع بها معلومات جسيم على جسيم آخر هى إلغاء المعلومات نفسها من الجسيم الأصلى. وهذه العملية الافتراضية أطلق عليها مؤخرًا اسم النقل عن بعد "التليبورتيشن Teleportation" .

وقد ظهرت الورقة التى تصف تجربة النقل عن بعد المثيرة عن فريق زايلنجر تحت اسم "النقل الكمى عن بعــد" فى مجلة نيتشر Nature رفيعــة المستوى عدد ديسمبر عــام ١٩٩٧، تأليف بومسـتـر D.Boomeester ، وبــان J.W.Pan ، ومـاتل K.Mattle ، وإيبل M.Eibl ، وفاينفورتر H.Weinfurter ، وزايلنجر، ويرد فيها:

"يتمثل حلم النقل عن بعد فى أن تكون قادرًا على الانتقال ببساطة من خلال الظهور مرة أخرى فى موضع آخر. وأى جسم يتم نقله عن بعد يمكن تمييزه تمامًا عن طريق خواصه، التى يمكن تحديدها فى الفيزياء الكلاسيكية بالقياس. وللحصول على نسخة من ذلك الجسم فى موضع آخر لا نحتاج إلى الأجزاء والقطع الأصلية، كل ما نحتاج إليه هو إرسال المعلومات المصوّرة بدقة التى يمكن استخدامها فى إعادة تركيب الجسم. بيد أنه إلى أى مدى يمكن أن تكون هنا نسخة حقيقية من الأصل، ماذا يحدث إذا كانت هذه الأجزاء والقطع إلكترونات وذرات وجزيئات؟". يناقش المؤلفون حقيقية أنه نظرًا لأن هذه العناصر الميكروسكوبية هى التى تصنع أى جسم مرئى؛ لذلك فهى تخضع لقوانين

ميكانيكا الكم، وينص مبدأ عدم التحدد لهايزنبرج على أنه لا يمكن قياسها بأى درجة من الدقة نحددها. واقترح بينيت وزملاؤه فكرة تسمى النقل عن بعد وطرحوها فى مقال فى مجلة فيزيكال ريفيو ليترز عام ١٩٩٣، وتقول الفكرة إنه قد يكون ممكنا نقل الحالة الكمية لجسيم إلى جسيم آخر – نقل كمى عن بعد – بشرط ألا يكون الشخص القائم بعملية النقل عن بعد لديه أى معلومات عن الحالة فى هذه العملية.

ويبدو منافيا للعقل أن يكون للمعلومات التى يحصل عليها مراقب من الخارج تأثير فيما يحدث مع جسيم، لكن طبقًا لميكانيكا الكم، فإن مجرد عملية مراقبة جسيم تدمِّر (أو "تُضعف بشدة") الدالة الموجية للجسيم. ولا يمكن معرفة، على سبيل المثال، خواص كمية الحركة والموضع لأى درجة مفترضة من الدقة. وبمجرد إجراء القياس (أو على نحو آخر التحقق من موقع) جسيم فى نطاق الكم سرعان ما تصبح النظم الكمية فى حالة مشوشة، وبالتالى تغدو المعلومات مدمرة أثناء عملية الحصول عليها.

إلا أن بينيت وشركاءه فى العمل كانت لديهم فكرة رائعة عن كيفية نقل شخص للمعلومات لجسم فى نطاق الكم بدون قياسه، بمعنى، بدون إضعاف دالته الموجية. وكانت الفكرة هى استخدام التعالق. ويتضح هنا كيفية عمل النقل عن بعد.

نفرض أن أليس لديها جسيم فى الحالة الكمية Q، التى لا تعلم هى عنها شيئا. وأليس تريد من بوب، الموجود فى موضع بعيد عنها، أن يكون لديه جسيم فى حالة هى نفسها حالة الجسيم الذى لديها. بمعنى أن أليس تريد من بوب أن تكون حالة الجسيم لديه هى Q أيضًا. وإذا أجرت أليس قياسا لجسيمها، فلن يكون ذلك كافيًا لأن Q لا يمكن تعيينها تمامًا بالقياس. أحد أسباب ذلك هو مبدأ عدم التحدد، وثمة سبب آخر هو أن الجسيمات الكمية تكون فى تراكب لعدة حالات فى الوقت نفسه. وإذا تم إجراء قياس، لتم إجبار الجسيم على أن يكون فى واحدة من حالات هذا التراكب. ويسمى هذا فرض الإسقاط Projection Postulate : حيث يتم إسقاط الجسيم فى حالة من حالات التراكب. وفرض الإسقاط هذا فى ميكانيكا الكم يجعل من المستحيل لأليس

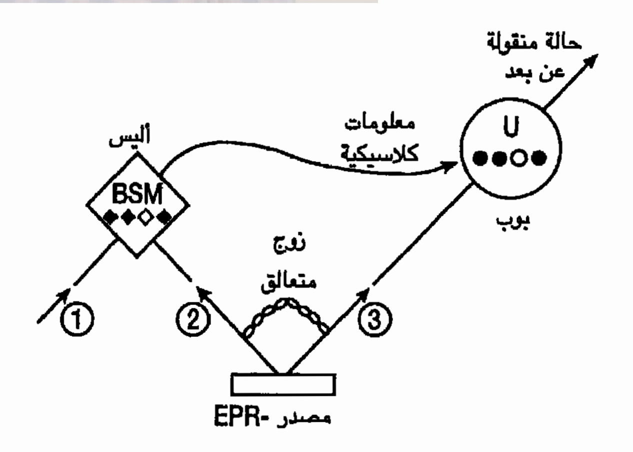
قياس الحالة Q ، للجسيم التابع لها بحيث نحصل منه على كل المعلومات عن Q ، والتى يحتاجها بوب منها كى يعيد تركيب حالة الجسيم لديها على الجسيم الذى لديه. وكما هو معتاد فى ميكانيكا الكم، فإن عملية مراقبة أى جسيم تدمر بعض المعلومات التى يتضمنها.

ومع ذلك، أمكن التغلب على هذه الصعوبة من خلال معالجة بارعة، حسبما كان يفهم بينيت وزملاؤه. فقد تأكدوا من أن دقة الإسقاط الافتراضى تتيح لأليس إمكانية نقل حالة الجسيم لديها عن بعد إلى بوب. إلا أن عملية النقل عن بعد تبعث لبوب بالحالة Q لجسيم أليس، فى حين أنها تدمر الحالة الكمية لجسيم أليس. وتتحقق هذه العملية باستخدام زوج من الجسيمات المتعالقة، أحدهما لدى أليس (ليس هو جسيمها الأصلى فى الحالة Q) والآخر لدى بوب.

وأوضح بينيت وزملاؤه أن المعلومات الكاملة المطلوبة كى يمكن إعادة بناء حالة الجسيم تنقسم إلى جزأين: جزء كمى وجزء كلاسيكى. ويمكن نقل المعلومات الكمية لحظيًا – باستخدام التعالق. لكن تلك المعلومات لا يمكن استخدامها بدون الجزء الكلاسيكى للمعلومات، التى يتعين إرسالها من خلال قناة كلاسيكية، مقيدة بسرعة الضوء.

ولذلك، ثمة قناتان لفعل النقل عن بعد: قناة كمية وقناة كلاسيكية. وتتكون القناة الكمية من زوج من الجسيمات المتعالقة: أحدهما فى حوزة أليس، والآخر لدى بوب. والتعالق رابطة غير مرئية بين أليس وبوب. إذ إنها رابطة ضعيفة، وينبغى الحفاظ عليها بالإبقاء على الجسيمين معزولين عن البيئة المحيطة بهما. وهناك طرف ثالث، هو شارلى الذى يقدم لأليس جسيما ثالثا. وحالة هذا الجسيم الثالث هى الرسالة التى يتعين على أليس بثها إلى بوب. ولا تستطيع أليس قراءة المعلومات وترسلها إلى بوب، لأنه – طبقا لقواعد ميكانيكا الكم – فإن فعل القراءة (عملية قياس) يُحدِث تغييرا فى المعلومات على نحو لا يمكن التنبؤ به، ولا يمكن الحصول على المعلومات كلها. تقيس أليس خاصية

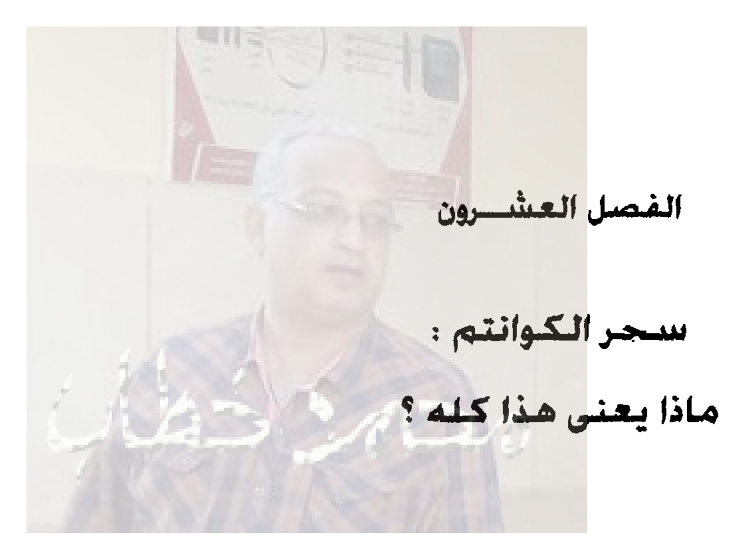
مشتركة بين الجسيم الذى قدمه لها شارلى والجسيم بحوزتها المتعالق مع جسيم بوب. وبسبب هذا التعالق، تكون استجابة جسيم بوب فورية، ويقدم له هذه المعلومات، والمتبقى منها تبعثها أليس إلى بوب بقياس الجسيم وإرسال تلك المعلومات الجزئية إليه من خلال قناة كلاسيكية. وهذه المعلومات تخبر بوب بما يحتاج إلى عمله مع جسيمه المتعالق للحصول على تحويل كامل لجسيم شارلى داخل جسيمه، باستكمال نقل جسيم شارلى عن بعد. والجدير بالذكر أنه لا أليس ولا بوب يعلمان حالة الجسيم المرسَل أو حالة الجسيم المستقبَل، بل يعلمان فقط أن الحالة تم بثها. وهذه العملية يوضحها الشكل التالى :



هل يمكن أن يتوسع النقل عن بعد ليشمل أجساما أكبر، مثلا الإنسان؟ عموما مازال الفيزيائيون ممتنعين عن إجابة هذا السؤال، باعتباره خارج مجال الفيزياء حاليًا، وربما يكون ممكنا فى عالم الخيال العلمى. بيد أن الكثير من التطورات العلمية والتكنولوجية ظلت فى إطار الخيال حتى تحققت على أرض الواقع. وكان من المعتقد بالنسبة إلى التعالق نفسه أنه مجرد عالم من التخيل حتى أثبت العلم أنه ظاهرة حقيقية، بالرغم من طبيعته المحيّرة.

وإذا حدث وأصبح ممكنًا نقل البشر عن بعد وكذلك الأجسام الكبيرة الأخرى، فهل يمكن لنا تصوّر كيف حدث ذلك؟ هذا السؤال، وكذلك السؤال السابق، يطرحان واحدا من أكبر الأسئلة الباقية بلا حل فى الفيزياء: أين هو الحد الفاصل بين عالم الأجسام المرئية الذى نعرفه من حياتنا اليومية، وعالم الجسيمات الدقيقة مثل الفوتونات والإلكترونات، والبروتونات والذرات، والجزيئات؟.

ومن خلال أبحاث دى برولى نعلم أن الجسيمات فى أحد مظاهرها لها طبيعة موجية، وأننا نستطيع قياس طول الموجة المصاحبة للجسيم. وبالتالى، من ناحية المبدأ، فإن أى شخص يمكن أن تصاحبه دالة موجية (ثمة نقطة فنية أخرى هنا، تخرج عن نطاق مناقشتنا فى هذا الكتاب، وهى أن الشخص أو أى جسم مرئى ليس حالة مجردة، بل على الأرجح أنه "خليط" من حالات) . والإجابة عن التساؤل عن مدى إمكانية تنفيذ النقل عن بعد لشخص يمكن أن يصاغ على النحو التالى: هل أى شخص هو مجموع عدد كبير من الجسيمات الأولية، كل جسيم منها له دالة موجية، أو أنه جسم مرئى مفرد له دالة موجية وحيدة (طولها الموجى قصير جدا)؟ وعند هذه النقطة فى الوقت الراهن، لا توجد إجابة واضحة لدى أى شخص على هذا السؤال، ولذلك مازال النقل عن بعد ظاهرة حقيقية، لكن فحسب فى إطار عالم ما صغير جدا.



الفصل العشـــرون

سـحـر الـكـوانـتـم :

مـاذا يـعـنـى هـذا كـلـه ؟

"تسفر فرضية جون بل عن نتائج مذهلة فلسفيًا: إما أن يهجر الإنسان كلية الفلسفة الواقعية لمعظم أعمال العلماء أو يراجع دراميا مفهومنا عن المكان - الزمان".

أبنر شيمونى وجون كلاوزر

"إذن وداعًا ، يا عناصر الواقع!".

دافيد ميرمين

ما معنى التعالق. ماذا يريد أن يقول لنا عن العالم وطبيعة المكان والزمان؟ ربما كانت هذه هى أصعب الأسئلة فى الفيزياء كلها.

- لقد دمر التعالق كل مفاهيمنا عن العالم، التى تطورت خلال خبراتنا الحسية المعتادة. فقد امتدت لأبعد مدى هذه الأفكار عن الواقع وترسخت عميقا فى نفوسنا، حتى إن ألبرت أينشتين أعظم فيزيائى فى القرن العشرين، ظل مخدوعا بهذه الأفكار المتداولة

يومياً إلى حد الاعتقاد بأن ميكانيكا الكم "ناقصة"؛ لأنها لا تشتمل على عناصر كان متأكدا من أنها لابد واقعية. وأحس أينشتين بأن ما يحدث فى موضع معين لا يمكن أن تكون له صلة، مباشرة ولحظية، بما يحدث فى موضع آخر تفصل بينهما مسافة. ولكى نفهم، أو حتى نتقبل ببساطة صحة ظاهرة التعالق وغيرها من ظواهر الكوانتم المصاحبة لها، يتعين علينا أولاً أن نقر بأن مفاهيمنا عن الواقع فى الكون ليست وافية.

على أن التعالق يعلّمنا أن خبراتنا اليومية لا تؤهلنا لقابلية فهم ما يحدث على مستوى الأجسام الدقيقة، التى ليس لنا بها خبرة مباشرة. ويقدم كتاب (The Quantum Challenge) لمؤلفيه جرينشتين Greenstein وزاجونيك Zajonic مثالا يشرح هذه الفكرة. إذا اصطدمت كرة بيبسبول بحائط به نافذتان فلا يمكنها الخروج من الغرفة بالمرور من النافذتين فى الوقت نفسه. وهذا شىء يعرفه أى طفل بشكل غريزى. لكن بالنسبة لإلكترون، أونيوترون، أو حتى ذرة، عندما يواجهها حاجز به فتحتان، فسوف تمر خلال الفتحتين فى الحال. إذ فى مجال نظرية الكم تتحطم الأفكار الخاصة بالسببية واستحالة أن يكون الجسيم فى مواضع مختلفة فى الوقت نفسه. كما أن فكرة التراكب – أى "يكون الجسيم فى موضعين فى اللحظة نفسها" – ترتبط بظاهرة التعالق. غير أن التعالق أكثر إثارة حتى من هذا، ذلك لأنه يحطم فكرتنا بأنه ثمة معنى للأبعاد المكانية. ويمكن توصيف التعالق بأنه مبدأ تراكبى يتضمن جسيمين أو أكثر. والتعالق تراكب لحالات جسيمين أو أكثر، مأخوذة بوصفها نظامًا واحداً. والبعد المكانى كما نعلم يبدو أنه قد تبخر بالنسبة لمثل هذا النظام. فالجسيمان اللذان تفصل بينهما مسافة سواء بالأميال أو بالسنوات الضوئية سيسلكان سلوكا متناغمًا: ما يحدث لأحدهما لابد أن يحدث للآخر فى اللحظة نفسها، بصرف النظر عن مقدار المسافة بينهما.

لماذا لا نستطيع استخدام التعالق فى بث رسالة بسرعة أكبر من سرعة الضوء؟

لعل التعالق ينتهك روح النسبية، بيد أن ذلك لا يعنى أنه يتيح لنا استخدامه فى بث رسالة بسرعة تتجاوز سرعة الضوء. وهذه نقطة فارقة بالغة الأهمية، وهى تكمن فى صميم طبيعة الظواهر الكمية. فعالم الكوانتم عالم عشوائى فى طبيعته. فعندما

نجرى عملية قياس، فإننا نجبر نظاما كمياً على "اختيار" قيمة فعلية، لذلك فهو يقفز من التشوش الكمى إلى نقطة محددة. وبناء عليه، حين تقيس أليس الحركة الدورانية للجسيم لديها فى اتجاه معين تختاره (أو، على نحو مماثل، عندما تقيس استقطاب فوتون فى اتجاه معين من اختيارها)، فإنها لا تستطيع اختيار النتيجة. وتكون النتيجة "لأعلى" أو "لأسفل"، بيد أن أليس لا يمكنها التنبؤ بقيمتها. وإذا أجرت أليس أى قياسات، لاضطر جسيم أو فوتون بوب لدخول حالة معينة (حركة دورانية مضادة فى الاتجاه للجسيم، واستقطاب فى الاتجاه نفسه للفوتون). ولكن نظراً لأن أليس لا تتحكم فى النتيجة التى تحصل عليها، فإنها لا تستطيع "بعث" أى معلومات ذات مغزى إلى بوب. كل ما يمكن حدوثه بسبب التعالق على النحو التالى. تستطيع أليس أن تختار إجراء واحدا من قياسات كثيرة ممكنة، وأيا ما كان القياس الذى تختاره فسوف تحصل على نتيجة ما. لكنها لن تعرف مسبقا أيا من النتيجتين ستحصل عليها. وبالمثل، يستطيع بوب أن يختار إجراء أى واحد من بين قياسات كثيرة دون أن يعرف النتيجة مقدما. لكن، وبسبب التعالق، إذا تصادف أنهما اختارا القياس نفسه، فإن نتائجهما التى لم يسبق التنبؤ بها ستكون متضادة (بفرض قياس الحركة الدورانية).

وبعد مقارنة نتائجهما فقط (باستخدام طريقة تقليدية للاتصال، لا يمكن من خلالها بعث معلومات بسرعة تتجاوز سرعة الضوء) يستطيع كل من أليس وبوب أن يدرك مدى توافق نتائجهما.

ويبدو الأمر فى ظاهره وكأنه لا يوجد ما يتعذر حله بالنسبة لمعاملات الارتباط القوية، يتعين فقط إدخال تعبير "عناصر واقعية" لتوضيحها، وهو ما كان يريد أينشتين أن يفعله. إلا أن برهان جون بل أدى بنا إلى استنتاج أن هذه المقاربة عديمة الجدوى.

ونسب أبنر شيمونى إلى التعالق قوله "انفعال من بعيد"، سعيا منه لتجنب شراك افتراض أنه يمكن لنا على نحو ما استخدام التعالق لبث رسالة بسرعة تفوق سرعة الضوء. ويعتقد شيمونى أن التعالق مازال يتيح لميكانيكا الكم والنظرية النسبية أن ينعما بـ "التعايش السلمى معا"، بمعنى أن التعالق لا ينتهك النسبية الخاصة بشكل صارم

(فلا يمكن لأى رسائل أن تسير بسرعة تتعدى سرعة الضوء). ومع ذلك، فإن فيزيائيين آخرين يعتقدون أن "روح النظرية النسبية" مازال ينتهكها التعالق، لأن "شيئا ما" (أيا كان نوعه) قد "ينتقل فعليا بسرعة" أكبر من سرعة الضوء (في واقع الأمر، بسرعة لانهائية) بين جسيمين متعالقين. ومن هؤلاء العلماء الذين يتبنون هذا الاعتقاد الراحل جون بل.

ومن الوسائل الممكنة لفهم التعالق تجنب النظر إلى النظرية النسبية على إطلاقها، وكذلك عدم التفكير في أن كيانين متعالقين مثل الجسيمات "يبعثان رسالة" من أحدهما إلى الآخر. ويناقش يانهوا شيه Yanhna Shih فى ورقة له تحت عنوان "التعالق الكمى" أنه نظراً لأن أى جسيمين متعالقين (على نحو ما) ليسا كيانين منفصلين، فإنه ليس ثمة حتى انتهاك واضح لمبدأ عدم التحدد، وفقا لما اقترحته EPR .

على أن الجسيمات المتعالقة تتجاوز المكان. إذ إن أى كينونتين أو ثلاثة كينونات هى فى واقع الأمر أجْزاء من نظام واحد، وهذا النظام لا يتأثر بالبعد الفيزيائى بين مكوناته؛ فالنظام يعمل باعتباره كينونة واحدة.

الأمر الساحر فى مسألة التعالق هو أن إحدى خواص ميكانيكا الكم التى تم الكشف عنها لأول مرة نجمت عن حسابات رياضية. والمذهل أن مثل هذه الخاصية العجيبة الغريبة عن دنيانا يتم العثور عليها رياضيًا. وهذا يدعم اعتقادنا فى القوة الفائقة للرياضيات. وبعد الاكتشاف الرياضى للتعالق، استخدم الفيزيائيون المهرة الوسائل والترتيبات المبدعة لإثبات أن هذه الظاهرة المذهلة تحدث فعليا. بيد أنه لكى نفهم حقيقة التعالق وكيف يعمل فما زال حتى الآن أمراً خارج نطاق ما وصل إليه العلم. ومن أجل أن نفهم التعالق، نعتمد نحن المخلوقات الواقعية على "عناصر من الواقع" – كما كان يطالب أينشتين – لكن كما تعلّمنا من جون بل ومن التجارب، فإن عناصر الواقع هذه ببساطة لا وجود لها. والبديل لعناصر الواقع هذه هو نظرية الكم. إلا أن ميكانيكا الكم لا تقول لنا لماذا تحدث الأشياء بالطريقة التى تحدث بها: ولماذا تتعالق الجسيمات؟ لذلك سنتوصل إلى فهم حقيقى شامل للتعالق فقط ما إن نتمكن من الإجابة عن سؤال جون أرشيبالد هويلر: "لماذا الكوانتم؟".

شكـــر

أقصى امتنانى لأبنر شيمونى، أستاذ الفيزياء والفلسفة الشرفى بجامعة بوسطن، لعونه الذى امتد ساعات طويلة، وتشجعيه ودعمه لى أثناء تحضيرى لهذا العمل. فقد أتاح لى أبنر بمنتهى الإيثار أن أستعير الكثير من الأوراق، والكتب، ومحاضر جلسات المؤتمرات فضلاً عن الخطابات والمخطوطات من مجموعته الشخصية ذات الصلة بنظرية الكم والتعالق. ولم يدخر أبنر جهداً فى الإجابة عن تساؤلاتى التى لا تحصى حول التعالق وسحر ميكانيكا الكم، شارحا لى حقائق غامضة لا حصر لها فى الرياضيات والفيزياء خاصة بعالم الكوانتم الغامض، وراويا قصة دوره الخاص فى مسألة التعالق، علاوة على الكثير من النوادر حول بحوث فهم هذه الظاهرة المحيرّة. وتبادلنا الحديث، أبنر وأنا، لساعات بمنزله، وفى السيارة، وأثناء تناول القهوة فى مطعم، وخلال جولات السير على الأقدام معا، أو حتى فى وقت متأخر من الليل بالهاتف، وأعرب عن بالغ تقديرى له لمساعدتى بكل الحب للوصول بهذا الكتاب إلى هذا المستوى، وكذلك فحص ومراجعة مخطوطته وتقديم اقتراحات كثيرة لتحسينه وتوضيحه.

وأود أن أعبر عن عميق تقديرى لميشيل هورن، أستاذ الفيزياء فى ستونهيل كولدج بماساشوستس، لإشراكه لى فى تفاصيل عمله مع أبنر شيمونى فى تصميم تجربة لاختبار متباينة جون بل، وعمله المهم حول قياس تداخل جسيم واحد وجسيمين وثلاثة جسيمات، وعمله الفذ حول تداخل ثلاثة جسيمات مع دانيال جرينبرجر وأنطون زايلنجر، المعروفة على نطاق واسع باسم تصميم GHZ . كذلك فإن تقديرى بلا حدود لمايك لمساعدته لى ساعات طويلة حينما كنت أعد هذه المخطوطة، ولإجابته عن أسئلتى العديدة ومعاونتى فى الوصول إلى الكثير من الأوراق والنتائج المهمة. وقد راجع مايك

بعناية النسخة الخطية، وصحح الكثير من أخطائى وعدم دقتى، وطرح كثيرا من الاقتراحات لتحسينها. كما أشكره لتعطفه بالسماح لى بنسخ مادة تعالق الجسيمات الثلاثة من محاضرته العلمية المتميزة فى ستونهيل كولدج كى أستخدمها فى هذا الكتاب. شكرا يا مايك.

وأقدم شكرى الجزيل لآلان أسبكت من مركز بحوث الضوء فى جامعة باريس فى أورسيه لشرحه عمله المهم لى، ولأنه علمنى بعض النقاط الدقيقة فى نظرية حالات التعالق. ويعطف زائد فتح آلان معمله أمامى، شارحا لى كيف صمم تجاربه التاريخية، وكيف أنشأ أجهزته المعقدة، وكيف حصل على نتائجه المذهلة حول الفوتونات المتعالقة. أقدم شكرى للبروفيسور أسبكت لوقته وجهده وحماسه بخصوص الفيزياء. شكراً آلان أسبكت.

وعلى نحو مؤكد قام جون كلاوزر وزميله ستيوارت فريدمان بتنفيذ أول تصميم لتجربة تختبر فرضية جون بل فى بيركلى عام ١٩٧٢، اعتماداً على العمل المشترك مع مايك هورن، وأبنر شيمونى وريتشارد هولت (ورقة CHSH الشهيرة). أقدم شكرى لجون كلاوزر لإشراكه لى فى نتائج تجاربه وتزويدى بأوراق كثيرة مهمة حول موضوع التعالق وللعديد من اللقاءات الفكرية العميقة.

وفى الأعوام التى أعقبت تجارب كلاوزر وأسبكت، طرح عدد من الفيزيائيين فى أنحاء العالم نتائج أخرى تفسر وجود الجسيمات المتعالقة وموجات الضوء. فقد أنتج نيكولاس جيسين من جامعة جنيف الفوتونات المتعالقة على مسافات هائلة. وشرح جيسين حالات التعالق للفوتونات التى تفصل بينها مسافة تبلغ عشرة كيلو مترات، كما درس خواص متعددة للحالات المتعالقة واستخدامها فى الشفرة الكمية وغيرها من المجالات التطبيقية. كما أنه معروف بعمله النظرى المهم حول فرضية جون بل. وقد أشركنى نيكولاس جيسين بسخاء فى نتائج تجاربه، وأشكره بحرارة لتزويدى بكثير من الأوراق البحثية التى صدرت عن مجموعته فى جامعة جنيف، فضلاً عن اللقاءات المعلوماتية.

مازالت مضامين التعالق بعيدة المنال، ويبحث العلماء حاليًا فى الكشف عن مضامينه فى الحساب الكمى quantum computing والنقل عن بعد. ويعتبر أنطون زايلنجر من جامعة فيينا عالمًا رائداً فى هذا المجال. وقد أوضح مع زملائه أن النقل عن بعد أضحى ممكنا، على الأقل بالنسبة إلى الفوتونات. واقتضى إنجاز عمل أنطون زايلنجر عدة عقود واشتمل على العمل الرائد حول تعالق الجسيمات الثلاثة، الذى تم بالاشتراك مع جرينبرجر وهورن (GHZ)، وكذلك تبادل التعالق وغيرهما من المشروعات التى تفسر العالم الغريب للجسيمات الدقيقة. وأقدم بالغ امتنانى لأنطون لتزويدى بمعلومات غزيرة عن عمله وإنجازاته. أيضًا فى فيينا، أعرب عن تقديرى لمس أندريا أجليبت من مجموعة زايلنجر البحثية لإمدادى بكثير من الأوراق والوثائق ذات الصلة بعمل المجموعة.

وأود الإعراب عن امتنانى للبروفيسير جون أرشيبالد هويلر من جامعة برنستون لترحيبه بى بمنزله فى Maine ولمناقشته معى أوجها مهمة كثيرة لميكانيكا الكم. وأشركنى البروفيسير هويلر فى أفكاره بخصوص ميكانيكا الكم ودورها فى فهم التحولات الكونية. إذ إن رؤيته لميكانيكا الكم فى الإطار الأرحب للفيزياء وعلوم الكون، ألقت ضوءاً مهمًا كاشفًا حول الأسئلة التى أثارها أينشتين، وبوهر وآخرون حول مغزى الفيزياء وموقعها فى بحث الإنسان الدؤوب عن الطبيعة.

وأعرب عن تقديرى للبروفيسير يانهوا شيه من جامعة ميريلاند، حيث دار بيننا لقاء مثير للاهتمام لمناقشة مشاريعه البحثية ذات الصلة بالتعالق، والنقل عن بعد وطريقة التحول البارامترى لأدنى. وكان البروفيسير شيه وزملاؤه أداة فاعلة فى استنتاج بعض الأدلة المذهلة لأقصى حد عن تأثيرات التعالق. وأقدم شكرى ليانهوا لأنه أطلعنى على الكثير من أوراقه البحثية.

وأوجه شكرى للبروفيسير دانيال جرينبرجر من جامعة سيتى بنيويورك لمعلوماته التى قدمها لى عن التصميم المدهش لتجربة GHZ والشرح النظرى الذى أمدنى به بالاشتراك مع هورن وزايلنجر، لفرضية جون بل بأسلوب بسيط ومؤثر. أنا ممتن لدانى للمعلومات الغزيرة حول عمله.

وتقديرى للبروفيسير وليم ووترز من ويليامز كولدج فى ماساشوستس للمقابلة المهمة التى جرت بيننا حول عمله ونظريته المشتركة بخصوص "فرضية عدم التناسخ"، مع زيوريك التى برهنت على أنه لا توجد "آلة نسخ" لميكانيكا الكم تحافظ على الأصول التركيبية، وقد انطوت على مضامين مهمة لنظرية الكم، بما فيها النقل عن بعد.

وشكرى للبروفيسير إميل وولف من جامعة روشستر لتفضُّله بمناقشة: غوامض الضوء، والتفاصيل المهمة حول عمله وعمل زميله الراحل ليونارد ماندل، الذى أدت إنجازاته الرائدة إلى اكتشاف خواص عديدة محيرة للفوتونات المتعالقة.

وشكرى الجزيل للبروفيسير أرافيند بمعهد وورشستر للبوليتكنيك فى ماساشوستس لإشراكه لى فى عمله حول التعالق، وقد شرح نتائج مدهشة لفرضية جون بل وحالات التعالق فى عدد من الأوراق النظرية. أشكرك يا أرافيند لأنك أطلعتنى على عملك ولتوضيحك لبعض أوجه نظرية الكم.

وأشكر البروفيسير هربرت برنشتين من هامبشاير كولدج فى ماساشوستس على المقابلة المهمة لمناقشة معنى التعالق. وأشكره أيضًا لإشارته لى إلى الأصل الألمانى ومعنى التعبير الأصلى الذى استخدمه إيروين شرودنجر فى وصف الظاهرة.

وأعرب عن تقديرى للدكتور وليم فيليبس من المعهد القومى للمعايير والتكنولوجيا، والحاصل على جائزة نوبل فى الفيزياء على مناقشته المهمة لأسرار ميكانيكا الكم وظاهرة التعالق إضافة إلى إمدادى بتفاصيل مهمة عن عمله فى ميكانيكا الكم.

وقد التقيت فى باريس بالدكتور كلود كوهين - تانودجى الحاصل على جائزة نوبل لعام ١٩٩٧ فى الفيزياء وكان سخيا جداً معى سواء فى الوقت الذى منحه لى أو المعلومات التى أمدنى بها عن عمله بالمشاركة فى أحد الكتب المدرسية الكلاسيكية فى المجال وهو ميكانيكا الكم، الذى أمضى خمس سنوات مع شريكه فى إخراج هذا العمل الرائع، وأشكر له عطفه لما أبداه من استعداد لتقديم خبرته لى.

وأشكر الفيزيائية الدكتورة مارى بل، أرملة جون بل لتعاونها فى إمدادى بالمادة المتعلقة بحياة زوجها الراحل وعمله.

وخالص تقديرى لميس فيليستى بورز من معهد نيلز بوهر فى كوبنهاجن لمساعدتها فى تيسير استخدام الصور التاريخية لنيلز بوهر وغيره من الفيزيائيين.

وأى أخطاء أو هفوات قد تظهر فى هذا العمل لا يتحمل مسئوليتها أى واحد من الخبراء الذين أعربت لهم عن تقديرى آنفا.

وأشكر ناشر الكتاب وصديقى جون أوكس، على دعمه وتشجيعه طيلة الوقت الذى كنت أعد فيه هذا الكتاب. وأشكر العاملين المثابرين فى دار النشر فوروالز إيت ويندوز: كاترين بلدن، وجوفى فيرارى - أدلر، وجون با لمساعدتهم وتفانيهم فى إخراج هذا الكتاب.

وأشكر زوجتى ديبرا لدعمها وتشجيعها.


محمد خطاب

هوامش

(١) ومع ذلك، لاحظ أن السببية مفهوم مراوغ ومعقد فى ميكانيكا الكم .

(٢) ذا نيويورك تايمز، ٢ مايو ٢٠٠٠، P.F1 .

(٣) ريتشارد فينمان، محاضرات فينمان الجزء الثالث :Reading. MA، أديسون - ويسلى، ١٩٦٣ .

(٤) وفق ما ذكره أبراهام بيز فى Niles Bohrs Times أوكسفورد، طبعة كلاريندون، ١٩٩١ .

(٥) الكثير من المعلومات حول السيرة الذاتية فى هذا الفصل مستقاة من كتاب والتر مور: Shrodinger : Life and Thought نيويورك، طبعة جامعة كامبردج، ١٩٨٩ .

(٦) المرجع السابق.

(٧) هورن ، وشيمونى ، وزايلنجر : "Down-conversion Photon Pairs A New Chapter in the History of Quantum Mechanical Entanglermrnt," التماسك الكمى، طبعة J.S.Anandan ، سنغافورة، World Scientific، ١٩٨٩ .

(٨) شرودنجر، أوراق مجمعة حول الميكانيكا الموجية، نيويورك، شيلسى، ١٩٧٨، ص ١٣٠ .

(٩) شرودنجر، محاضر جلسات الجمعية الفلسفية في كامبردج ٣١ (١٩٩٥) ٥٥٥ .

(١٠) أرمين هيرمان، ويرنر هايزنبرج ١٩٠١ - ١٩٧٦، بون : InterNations ، ١٩٧٦ .

(١١) لقاء للمؤلف مع جون أرشيبالد ويلر، ٢٤ يونيو ٢٠٠١ .

(١٢) ويلر: "Law without Law" ضمن مجموعة أوراق Quantum Theory and Measurement ، تحرير ويلر وزيوريك، برنكتون، طبعة جامعة برنكتون ، ١٩٨٣ .

(١٣) المرجع السابق ص ١٨٢ - ١٨٣ .

(١٤) المرجع السابق ص ١٨٩ .

(١٥) الكثير من معلومات السيرة الذاتية فى هذا الفصل مستمدة من :

Norman John von Neumann: The Scientific Genius Who Pioneered The Macrae Modern Computer Game Theory Nuclear Deterrence and Much More جمعية الرياضيات الأمريكية، ١٩٩٢ .

(١٦) انظر : أمير أكزل : God's Equation ، نيويورك : Four Walls Eight Windows ، ١٩٩٩ .

(١٧) فولسنج : Albert Einstein ، نيويورك، فيكينج، ١٩٩٧، ص ٤٤٧ .

(١٨) لويس دى برولى : New Perspectives ، نيويورك : Basic Books ، ١٩٦٢، ص ١٥٠ .
(٢٠) ورد فى كتاب ويلر وزيوريك : Quantum Theoyg and Measure ment ، طبعة جامعة برنكتون ، ١٩٨٣، ص ٧١١١ .
(٢٠) مقتطف من كتاب هويلر وزيوريك ، ١٩٨٣، ص ٧ .
(٢١) إبراهام بياس : Niels Bohr's Times ، نيويورك، طبعة كلاريندون، ١٩٩١، ص ٤٢٧ .
(٢٢) ويلر وزيوريك ص ١٣٧ .
(٢٣) ألبرت أينشتين ، وبوريس بودوليسكى، وناثان روسين،
"Can Quantum - Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete?", Physical Review.
العدد ٤٧ ، ص ص ٧٧٧، ٧٨٠ ، عام ١٩٥٥ .
(٢٤) بياس ١٩٩١، ص ٤٣٠
(٢٥) هويلر وزيوريك ١٩٨٣ .
(٢٦) المرجع فى الملاحظة ٢٣ ص ٧٧٧ .
(٢٧) من كتاب ألبرت اينشتين، العالم الفيلسوف، Schilpp Evanston مكتبة الفلاسفة الأحياء، ١٩٤٩، ص ٨٥ .
(٢٨) مأخوذة بتصريح من كتاب كلاوزر "Early History of Bell's Theorem" دعوة للحديث تمت فى Plenary Historical Session ، مؤتمر روشستر الرابع حول التماسك والضوء الكمى، ٢٠٠١، ص ١١ .
(٢٩) آلان أسبكت: "ثلاثة تجارب لاختبار فرضية جون بل حول معاملات الارتباط واستقطاب الفوتونات" أطروحة لنيل درجة الدكتوراه فى علوم الفيزياء من جامعة باريس، أورسيه، أول فبراير ١٩٨٣، ص١ .
(٣٠) تجربة الصورة الشبحية وردت فى كتاب شيه :
"Quantum Entanglement and Quantum Teleportation"، حوليات الفيزياء، أكتوبر ٢٠٠١، الجزء ١-٢ ، ص ٤٥-٦١ .
(٣١) النقاش السابق بتصريح من كتاب ميشيل هورن :
"Quantum Mechanics for Everyone" المحاضرات العلمية المتميزة - الجزء الثالث عن ستونهيل كولدج، أول مايو ٢٠٠١ ص ٤ .
(٣٢) "Bell's Theorem Without Inequalities" تأليف جرينبرجر، وهورن، وشيموني، وزايلنجر. المجلة الأمريكية للفيزياء العدد ٥٨ ، ١٢ ديسمبر ١٩٩٠، ص ١١٣١ - ١١٤٣ .
(٣٣) واردة فى أرافيند : "Borromean Entanglement of the Ghz State"
Potentiality Entanglementand Passion - At - Distance ص ١٩٥٣، ١٩٥٩، ١٩٩٧، Kluwer Academic Publishing ، إنجلترا .

المراجــع

صدر الكثير من الأعمال الخاصة بالتعالق والأبحاث ذات الصلة بالظواهر الفيزيائية فى المجلات العلمية وضمن وقائع جلسات المؤتمرات. وقد أشرتُ خلال نصوص الكتاب إلى أهم المقالات التى تناولت هذه المجالات. وأقدم فيما يلى قائمة بمراجع أخرى يسهل التوصل إليها، وقد تكون ملائمة أكثر للقارئ غير المتخصص، كما أنها متوفرة فى المكتبات. أما القارئ المتخصص فبإمكانه تتبع هذه المقالات فى المجلات المعروفة مثل: Nature Physics Today وغيرها.

كتب ذات صلة بالتعالق وميكانيكا الكم :

١ – Bell, J.S. Speakable and Unspeakable in Quantum Mechanics، نيويورك: طبعة جامعة كامبردج، ١٩٩٣ . يحتوى هذا الكتاب على معظم أوراق جون بل حول ميكانيكا الكم

٢ – Bohm David. Casuality and Chance in Modern Physics ، فيلادلفيا: طبعة جامعة بنسلفانيا، ١٩٥٧ .

٣ – Bohm David. Quantum Theory . نيويورك، دوفر، ١٩٥١ .

٤ – Cohen, R., S., Horn, M., and J.Stachel, eds. Experimental Metaphysics: Quantum Mechanical Studies for Abner Shimony . الجزء الأول والثانى. بوسطن: صادر عن كلوار للنشر الأكاديمى ١٩٩٩ . يضم هذان الجزآن كثيراً من الأوراق البحثية لأبنر شيمونى.

٥ – Cornwell, J. F. Group Theory in Physics . سان دييجو: المطبعة الأكاديمية، ١٩٩٧ .

٦ – Dirac, P. A. M. The Principles of Quantum Mechanics ، الطبعة الرابعة. أوكسفورد طبعة كلاريندن، ١٩٦٧ .

٧ – French, A. P., and E. Taylor: An Introduction to Quantum Physics ، نيويورك: نورتون، ١٩٧٨ .

٨ – Folsing, A. Albert Einstein. نيويورك: بنجوين، ١٩٩٧ .

٩ – Gamow, George. Thirty Years that Shook Physics: The Story of Quantum Theory ، نيويورك: دوفر ١٩٦٦ .

١٠ – Gell-Mann, Murray, The Quarkand the Jaguar ، نيـويورك: فـريمـان، ١٩٩٤ .

١١ – Greenberger, D., Reiter, L., and A. Zeilinger, eds Epistemological and experimental Perspectives on Quantum Mechanics ، بوسطن: كلوفـر للنشر الأكاديمى، ١٩٩٩ . يحتوى هذا الكتاب على كثير من الأوراق البحثية الخاصة بالتعالق.

١٢ – Greenstein, G.and A. G. Zaionc. The Quantum Challenge: Modern Research on the Foundations of Quantum Mechanics. Sudbury, MA: جـونز آند بارلت، ١٩٩٧ .

١٣ – Heilborn, J. L. The Dilemmas of an Upright Man: Max Plank and the Fortune of German Science ، كامبردج، إم آ: طبعة جامعة هارفارد، ١٩٩٦ .

١٤ – Hermann, Armin. Heisenberg 1901- 1976 ، بون: انترنيشنز، ١٩٧٦ .

١٥ – Ludwig, Gunther. Wave Mechanics ، نيويورك: بيرجامون، ١٩٦٨ .

١٦ – Macrae, Norman. John von Neomann: The Scientific Genius Who Pioneered the Modern Computer, Game Theory, Nuclear Deterrence, and Much More ، بروفيدنس، الجمعية الأمريكية للرياضيات، ١٩٩٢ .

١٧ – Messiah, A. Quantum Mechanics . الجــزآن الأول والثــانى. نيــويورك: دوفر، ١٩٥٨ .

١٨ – Moore, Walter. Schrodinger: Life and Thought . نيويورك: طبعة جامعة كامبردج، ١٩٨٩ .

١٩ – Pais, Abraham. Niels Bohr's Time: in Physics, Philosophy, and Polity . أوكسفورد: طبعة كلاريندون، ١٩٩١ .

٢٠ – Penrose, R. The Large, the Small and the Human Mind . نيــويورك، طبعة جامعة كامبردج، ١٩٩٧ . مناقشة مهمة حول قضايا الكوانتم والنسبية، ويتضمن تعليقات من أبنر شيمونى، ونانسى كارترايت، وستيفن هاوكنج.

٢١ – Schilpp, P. A., ed. Albert Einstein, Philosopher Scientist . إيفانستون، مكتبة ليفنج فيلوسوفرز، ١٩٤٩ .

٢٢ – Spielberg, N,. and B. D. Anderson. Seven Ideas That Shook the Universe . نيويورك: ويلى، ١٩٨٧ .

٢٣ – Styer, Daniel F. The Strange World of Quantum Mechanics . نيويورك: مطبعة جامعة كامبردج، ٢٠٠٠ .

٢٤ – Tomonaga, Sin-Itiro. Quantum Mechanics . الجــزآن الأول والثــانى، أمستردام: نورث هولاند ١٩٦٦ .

٢٥ – Van der Waerden, B. L. ed. Sources of Quantum Mechanics . نيويورك: دوفر، ١٩٦٧ .

٢٦ – Wheeler, J. A. and W. H. Zurek, eds. Quantum Theory and Measurement . برينستون: طبعة جامعة برينستون، ١٩٨٣ . وهى مجموعة فاخرة من الأوراق البحثية حول ميكانيكا الكم.

٢٧ – Wick, D. The Infamous Boundary: Seven Decades of Heresy in Quantum Physics . نيويورك: كوبرنيكوس، ١٩٩٦ .


محمد خطاب

ثبت المصطلحات

تنويه :

أغلب الكلمات التالية لها معان كثيرة، وسأكتفى هنا بذكر معانيها المستخدمة فى الفيزياء والرياضيات.

أ	a
الصفر المطلق	absolute zero
امتصاص	absorption
العجلة	acceleration
السعة	amplitude
تحليل	analysis
أشعة المصعد (الأنود)	anode rays
جهاز	apparatus
التركيب الذرى	atomic structure
التجاذب	attraction
موجة مصاحبة	associated wave
يصعد	ascend
فلزات قاعدية	alkali metals
كمية الحركة الزاوية	angular momentum

b

barrier	حائل - حاجز
black body radiation	إشعاع الجسم المعتم
basic tone	نغمة أساسية
Bose - Einstein condensation	متكثف بوز - أينشتين
bucky ball	كرة الباكى: جزئ يتكون من ٦٠ أو ٧٠ ذرة كربون

c

cathode rays	أشعة المهبط (الكاثود)
chemical bonds	الروابط الكيميائية
column	عمود
commutative	قابلة للإبدال
conduction	توصيل
cryptography	الكتابة بالشفرة
computing	الحوسبة
collision	تصادم
current	تيار

d

data	بيانات
deflect	يحرف - ينحرف
derivative	مشتقة
descend	يهبط
differential equation	معادلة تفاضلية
double - slit experiment	تجربة الشق (الثقب) المزدوج
duality	ازدواجية
diffraction	الحيود

de Broglie principle	مبدأ دى برولى للجسيمات الدقيقة
discovery	اكتشاف
dispersion	تشتت
distribution	توزيع
down - conversion	التحول لأدنى
e	
Einstein photon	فوتون أينشتينى
emitting energy	الطاقة المنبعثة
entanglement	التعالق – التشابك
expansion of the universe	تمدد الكون
entity	كيان – كينونة
energy level	مستوى طاقة
Einstein cosmological constant	الثابت الكوزمولوجى (الكونى) لأينشتين
electric charge	شحنة كهربية
energy curve	منحنى الطاقة
Entropy	الإنتروبى – الإنتروبيا
electromagnetism	المغناطيسية الكهربية
electron theory of metals	النظرية الإلكترونية للفلزات
equivalent	مكافئ
experimental physics	الفيزياء التجريبية
exponential function	الدالة الأسية
f	
field	المجال
frequency	التردد

g

gamma rays	أشعة جاما
gravitation	الجاذبية الأرضية

h

harmony	التوافق
Hilbert space	فضاء هلبرت

I

ideal gas	غاز مثالى
instantaneously	لحظى - آنى
infinity	لا نهائى
interference	التداخل
internal combustion engine	آلة الاحتراق الداخلى
inertia	قصور ذاتى
inductance	الحث
isolator	عازل

j

Jupiter	كوكب المشترى

k

kinetic energy	طاقة الحركة

l

laser rays	أشعة الليزر
linear equation	معادلة خطية
liquified gases	غازات مسالة
local hidden variables	متغيرات محلية خافية
Leaning Tower of Pisa	برج بيزا المائل

m

Milky way	مجرة درب اللبانة
matrix mechanics	ميكانيكا المصفوفة
moist air	الهواء الرطب
molecular heat	الحرارة الجزيئية
momentum	العزم - كمية الحركة
molecule	جـزىء
music theory	النظرية الموسيقية
missile	صاروخ

n

nucleus	النواة

o

operator	مؤثر - عامل
orbit	مدار - مسار
oscilate	يتذبذب
over tone	نغمة توافقية

p

parameter	بارامتر - مؤشر
particle	جسيم دقيق
periodic table of elements	الجدول الدورى للعناصر
phase	الطور
photon	فـوتون
photo-electric effect	التأثير الكهروضوئى
Principa	المبادئ الأساسية - كتاب لنيوتن صدر عام ١٦٨٧
Pattern	نموذج - شكل

peak	قمة
phenomenon	ظاهرة
pilot waves	موجات استرشادية
Plancks constant	ثابت بلانك
pole	قطب
position	مكان – موضع
potential energy	طاقة الوضع
probability	الاحتمال
propagation	انتشار
potentiality	الاحتمالية
q	
quantum mechanics	ميكانيكا الكم
quantum principle of complimentary	مبدأ تكاملية الكوانتم
r	
radio-activity	النشاط الإشعاعى
radio-waves	موجات الراديو
radius	نصف القطر
rate of change	معدل التغير
repultion	التنافر
rigid body	الجسم الجاسئ
row	صف
s	
Schrodinger equation	معادلة شرودنجر
series	سلاسل
sin function	الدالة الجيبية

Solvay Conference	مؤتمر سولفاى
space craft	سفينة فضاء
statistical	إحصائى
Saturn	كوكب زحل
source	مصدر
screen	حائل - شاشة
spectral lines	خطوط الطيف
spectrum	الطيف
spectrum of radiation	طيف الإشعاع
submicroscopic	تحت مجهرى
superconductor	الموصل الفائق
superfluidity	التميع الفائق
superposition	تراكب
surface tention of water	الشد السطحي للماء
spontaneous	لحظيا آنيا

t

teleportation	النقل عن بعد
thermodynamics	الديناميكا الحرارية
theoretical physics	الفيزياء النظرية
thought experiment	تجربة فكرية
trajectory	مسار متوقع
three-dimentional space	الفضاء ثلاثى الأبعاد
trigonometric function	الدالة المثلثية
trough	قاع
transparant	شفاف

u

ultra-violet catastroph	كارثة الأشعة فوق البنفسجية
uncertainty principle	مبدأ عدم التحدد (عدم اليقين)

v

vibration	ذبذبة
visible light	الضـوء المرئى

w

wave equation	المعادلة الموجية
wave length	طول الموجة
wave motion	الحركة الموجية
wave theory of light	النظرية الموجية للضوء

المؤلف فى سطور :

أمير أكزيل

حصل على بكالوريوس العلوم فى الرياضيات من جامعة كاليفورنيا فى بيركلى ، ثم الماجستير والدكتوراة من جامعة أوريجون . مارس تدريس الرياضيات والإحصاء لمدة ٢٥ عاما فى عدة جامعات، وصدر له الكثير من الأوراق البحثية، ونحو ١٤ كتاباً منها :

Fermat's last theorem (1997).

The mystery of the Aleph (2001).

The riddle of the compass (2002).

Pendulum (2004).

المترجم فى سطور :

عنان على الشهاوى

بكالوريوس علوم جامعة عين شمس فيزياء - رياضة عامة.

صحفى بجريدة العالم اليوم.

ترجم : شتاء فى يوليو (مجموعة قصصية للكاتبة البريطانية دوريس ليسنج).

- الفهد جورج (مجموعة قصصية لنفس الكاتبة).
- الأصول الثقافية والاجتماعية لحركة عرابى فى مصر.
- معجم تاريخ مصر.
- الأصول الاجتماعية للسياسة التوسعية لمصر فى عهد محمد على.

المراجع فى سطور:

مصطفى إبراهيم فهمى

دكتوراه فى الكيمياء الإكلينيكية، جامعة لندن ١٩٦٩ .

عضو لجنة الثقافة العلمية بالمجلس الأعلى للثقافة بمصر، وعضو أمانة المركز القومى للترجمة. ترجم ما يزيد عن ٥٠ كتاباً فى الثقافة العلمية.

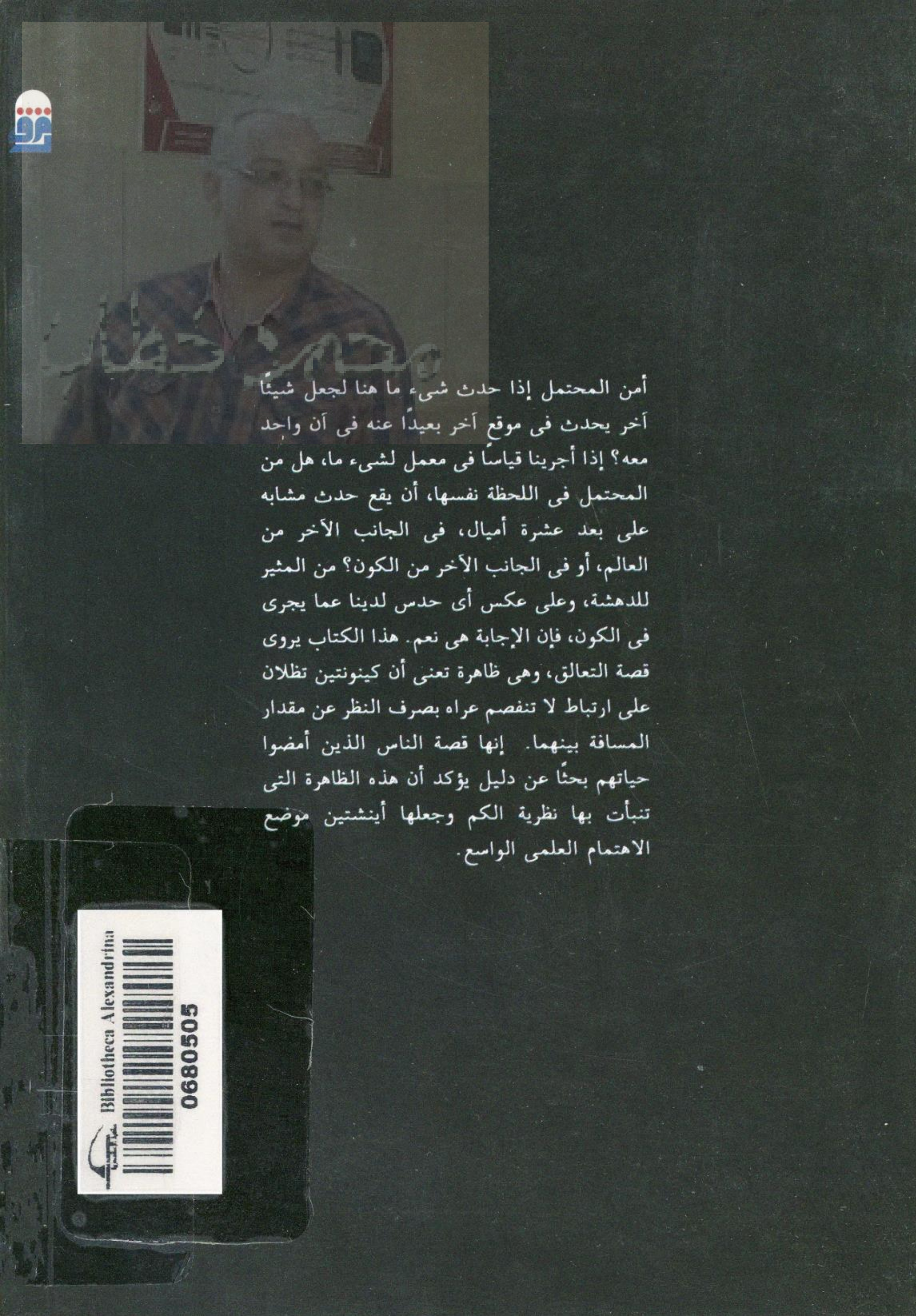

محمد خطاب



التصحيح اللغوى : خـالـد منـصور

الإشراف الفنـى : حـسـن كـامـل


محمد خطاب



أمن المحتمل إذا حدث شىء ما هنا لجعل شيئًا آخر يحدث فى موقع آخر بعيدًا عنه فى آن واحد معه؟ إذا أجرينا قياسًا فى معمل لشىء ما، هل من المحتمل فى اللحظة نفسها، أن يقع حدث مشابه على بعد عشرة أميال، فى الجانب الآخر من العالم، أو فى الجانب الآخر من الكون؟ من المثير للدهشة، وعلى عكس أى حدس لدينا عما يجرى فى الكون، فإن الإجابة هى نعم. هذا الكتاب يروى قصة التعالق، وهى ظاهرة تعنى أن كينونتين تظلان على ارتباط لا تنفصم عراه بصرف النظر عن مقدار المسافة بينهما. إنها قصة الناس الذين أمضوا حياتهم بحثًا عن دليل يؤكد أن هذه الظاهرة التى تنبأت بها نظرية الكم وجعلها أينشتين موضع الاهتمام العلمى الواسع.